

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Šimičić

Zagreb, 2012.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Doc. dr. sc. Mirko Jakopčić

Student:

Marko Šimičić

Zagreb, 2012.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno, koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvalio bih na početku svome mentoru doc. dr. sc. Mirku Jakopčiću koji me je vodio i imao strpljenja tijekom izrade ovoga rada.

Posebno se zahvaljujem prof. dr. sc. Krešimiru Grilecu na savjetima, strpljenju i pomoći pri ispitivanjima i karakterizaciji uzoraka.

Zahvaljujem se svim profesorima i osoblju Katedre za materijale i tribologiju što su mi omogućili korištenje laboratorija pri izradi eksperimentalnog dijela rada.

Na kraju se najviše zahvaljujem svojoj mami Jagodi koja mi je bila najveća podrška tijekom mog studiranja.

Marko Šimičić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za završne i diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
procesno-energetski, konstrukcijski, brodostrojarški i inženjersko modeliranje i računalne
simulacije

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

Mat. br.:

Naslov:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Mladen Andrassy

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	V
POPIS OZNAKA	VII
SAŽETAK	VIII
1. UVOD	1
2. NAMJENA I OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE OŽLJEBLJENIH CIJEVI TOPNIČKIH ORUŽJA	3
3. MJERENJE ISTROŠENOSTI CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA	10
3.1. Mjerenje povećanja kalibra cijevi	11
3.2. Mjerenje produženja barutne komore	14
3.3. Vizualni pregled kanala i vanjske površine cijevi	15
3.4. Usporedba broja izvršenih opaljenja s predviđenim životom cijevi	16
3.5. Provjera savijenosti cijevi	16
4. KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE PROJEKTILA NAMIJENJENOG KRETANJU KROZ OŽLJEBLJENU CIJEV	18
5. ABRAZIJSKO TROŠENJE I NJEGOVO NASTAJANJE U CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA	21
5.1. "Čista" abrazija	25
5.2. Selektivna abrazija	26
5.3. "Nulta" abrazija	27
5.4. Abrazijsko trošenje cijevi topničkog oružja	28
6. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE I IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU UZORAKA	29
6.1. Izbor materijala otpornih na abrazijsko trošenje	31
6.2. Izbor materijala za izradu uzoraka	33
6.2.1. Poboljšavanje	35
6.2.1.1. Klasično poboljšavanje	35
6.2.1.2. Izotermičko poboljšavanje	35
6.2.2. Nitiranje	37
6.2.2.1. Plinsko nitiranje	38
6.2.2.2. Nitiranje u plazmi	39
6.2.2.3. Nitiranje u solnoj kupci	40
6.2.3. Tvrdokromiranje	42
7. EKSPERIMENTALNI DIO	43
7.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanih, nitiranih i tvrdokromiranih uzoraka odabranih čelika za topničke cijevi	43
7.2. Rezultati ispitivanja	44
7.2.1. Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN C45	44
7.2.2. Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 25CrMo4	45

7.2.3.	Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 36CrNiMo4.....	46
7.3.	Analiza rezultata dobivena ispitivanjem otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanih, nitriranih i tvrdo kromiranih čeličnih uzoraka EN C45, EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4	50
7.4.	Karakterizacija čeličnih uzoraka ispitivanih na abrazijsko trošenje.....	52
7.4.1.	Brušenje.....	54
7.4.2.	Poliranje.....	54
7.5.	Mjerenje tvrdoće.....	58
7.5.1.	Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku od čelika EN C45	58
7.5.2.	Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku od čelika EN 25CrMo4	59
7.5.3.	Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku od čelika EN 36CrNiMo4.....	60
7.6.	Analiza rezultata dobivena mjerenjem tvrdoće tvrdo kromiranih uzoraka od čelika EN C45, nitriranih uzoraka od čelika EN 25CrMo4 i poboljšanih uzoraka od čelika EN 36CrNiMo4.	62
8.	ZAKLJUČAK.....	65
	LITERATURA.....	66

POPIS SLIKA

Slika 2.1.	Uzdužni presjek cijevi topničkog oružja [4].....	3
Slika 2.2.	Kanal ožljebljene cijevi [5].....	4
Slika 2.3.	Rotacija projektila pri izlasku iz ožljebljene cijevi [5].....	4
Slika 2.4.	Barutna komora za naboj s čahurom [4].....	5
Slika 2.5.	Prijelazni konus [4]	6
Slika 2.6.	Poprečni presjek vodećeg dijela cijevi [4].....	7
Slika 2.7.	Žlijeb cijevi razvijen u ravnini x-y [4]	8
Slika 3.1.	Kalibarnik ili mikrometerska zvijezda [8].....	11
Slika 3.2.	Očitavanje na skalama kalibarnika [7]	12
Slika 3.3.	Mjerenje produženja barutne komore [7].....	14
Slika 3.4.	Endoskop [7].....	15
Slika 3.5.	Kontrolnik za provjeru savijenosti cijevi [8]	17
Slika 4.1.	Topnički projektil [4]	18
Slika 4.2.	Položaj vodećih prstenova projektila u odnosu na barutnu komoru [12].....	18
Slika 5.1.	Jedinični događaj abrazije [14].....	22
Slika 5.2.	Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [15]	23
Slika 5.3.	Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala [16].....	24
Slika 5.4.	“Čista” abrazija [14].....	25
Slika 5.5.	Selektivna abrazija [14].....	26
Slika 5.6.	“Nulta” abrazija [14]	27
Slika 6.1.	Skica uređaja “suhi pijesak - gumeni kotač” [14].....	29
Slika 6.2.	Uređaj “suhi pijesak - gumeni kotač”.....	30
Slika 6.3.	Dijagram postupka klasičnog poboljšavanja čelika [23].....	35
Slika 6.4.	Dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja čelika [23]	36
Slika 6.5.	Postupak nitriranja u plazmi [28].....	39
Slika 6.6.	Dijagram postupka TENIFER i TENIFER QPQ [30].....	41
Slika 7.1.	Gubici mase pri abrazijskom trošenju ovisno o broju okretaja kotača za nitrirane čelične uzorke	50
Slika 7.2.	Gubici mase pri abrazijskom trošenju ovisno o broju okretaja kotača za tvrdo kromirane čelične uzorke.....	50
Slika 7.3.	Gubici mase pri abrazijskom trošenju ovisno o broju okretaja kotača za poboljšane čelične uzorke.....	51
Slika 7.4.	Kalup za uzorke	52
Slika 7.5.	Uređaj za brušenje i poliranje - STRUERS DAP - V	53
Slika 7.6.	Pripremljeni uzorci za brušenje i poliranje.....	53
Slika 7.7.	Brušenje uzoraka.....	54
Slika 7.8.	Poliranje uzoraka.....	55
Slika 7.9.	Metalografska snimka presjeka površinskog sloja nitriranog uzorka od čelika EN 25CrMo4.....	56
Slika 7.10.	Metalografska snimka presjeka površinskog sloja tvrdo kromiranog uzorka od čelika EN C45	57
Slika 7.11.	Metalografska snimka presjeka površinskog sloja poboljšanog uzorka od čelika EN 36CrNiMo4.....	57

Slika 7.12. Raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika EN C45	62
Slika 7.13. Raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika EN 25CrMo4	62
Slika 7.14. Raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika EN 36CrNiMo4.....	63
Slika 7.15. Srednje vrijednosti tvrdoće po jezgri uzoraka	63

POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Opadanje početne brzine projektila v_0 i balistički život cijevi haubice 105 mm M2A1 [9].....	13
Tablica 3.2. Opadanje početne brzine projektila v_0 ovisno o produženju barutne komore topa 13 mm M46 [10]	14
Tablica 6.1. Varijante postupka “suhi pijesak - gumeni kotač” [17]	30
Tablica 6.2. Opis ispitivanja “suhi pijesak - gumeni kotač” [18]	31
Tablica 6.3. Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije [19].....	32
Tablica 7.1. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranog čelika EN C45	44
Tablica 7.2. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdo kromiranog čelika EN C45.....	44
Tablica 7.3. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanog čelika EN C45	44
Tablica 7.4. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranog čelika EN 25CrMo4	45
Tablica 7.5. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdo kromiranog čelika EN 25CrMo4	45
Tablica 7.6. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanog čelika EN 25CrMo4.....	45
Tablica 7.7. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranog čelika EN 36CrNiMo4	46
Tablica 7.8. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdo kromiranog čelika EN 36CrNiMo4.....	46
Tablica 7.9. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanog čelika EN 36CrNiMo4.....	46
Tablica 7.10. Srednje vrijednosti gubitka mase nitriranih čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 35CrNiMo4.....	47
Tablica 7.11. Srednje vrijednosti gubitka mase tvrdo kromiranih čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 35CrNiMo4.....	48

Tablica 7.12. Srednje vrijednosti gubitka mase poboljšanih čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4.....	49
Tablica 7.13. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45, 1. serija mjerenja.....	58
Tablica 7.14. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45, 2. serija mjerenja.....	58
Tabela 7.15. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45, 3. serija mjerenja.....	58
Tablica 7.16. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4, 1. serija mjerenja	59
Tablica 7.17. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4, 2. serija mjerenja	59
Tablica 7.18. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4, 3. serija mjerenja	59
Tablica 7.19. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4, 1. serija mjerenja	60
Tablica 7.20. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4, 2. serija mjerenja	60
Tablica 7.21. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4, 3. serija mjerenja	60
Tablica 7.22. Vrijednosti tvrdoće jezgre za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45.....	61
Tablica 7.23. Vrijednosti tvrdoće jezgre za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4	61
Tablica 7.24. Vrijednosti tvrdoće jezgre za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4	61
Tablica 7.25. Usporedbe srednjih vrijednosti gubitka mase nakon različitog broja okretaja i srednjih vrijednosti tvrdoće po jezgri tvrdo kromiranog uzorka od čelika EN C45, nitiranog uzorka od čelika EN 25CrMo4 i poboljšanog uzorka od čelika EN 36CrNiMo4.....	64

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
d	mm	Kalibar cijevi
a	mm	Širina polja
b	mm	Širina žlijeba
h	mm	Dubina žlijeba
l_u	mm	Ukupna duljina
ε		Relativna duljina koraka
l	mm	Apsolutna duljina koraka žlijeba
α	°	Kut uvijanja žlijeba
α_u	°	Kut uvijanja na ustima cijevi
α_0	°	Kut uvijanja na početku ožljebljenja
v_0	m/s	Početna brzina projektila
Δ_{\min}	μm	Minimalna dijametralna zračnost prema Gabeadu
d_c	μm	Promjer centrirajućih prstenova na košuljici projektila
H_c	mm	Širina prednjeg centrirajućeg prstena prema Tretjakovu
d_p	mm	Vanjski promjer vodećeg prstena
d_o	mm	Promjer kanala cijevi preko žljebova
Δ_l	mm	Veličina forsiranja
F_N	N	Normalna komponenta opterećenja
F_t	N	Tangencijalna komponenta opterećenja
F	N	Sila
n_{okr}	o/min	Brzina vrtnje kotača
$v_{\check{c}}$	m/s	Brzina abraziva
$R_{p0,2}$	N/mm^2	Konvencionalna granica razvlačenja
R_m	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
A	%	Istezljivost
Z	%	Konačno suženje presjeka
KU	J	Udarna radnja loma
t	s, min	Vrijeme

SAŽETAK

U radu je opisana namjena i osnovne konstrukcijske značajke ožljebljene cijevi topničkog oružja i načini mjerenja njezine istrošenosti. Također su prikazane konstrukcijske značajke projektila namijenjenog kretanju kroz ožljebljenu cijev. Opisani su mehanizmi abrazijskog trošenja i njegovo nastajanje u cijevi topničkog oružja, te je opisan način ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje i izbor materijala za izradu uzoraka. U eksperimentalnom dijelu rada prikazano je i opisano ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje uzoraka od čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4 u tvrdo kromiranom, nitriranom i poboljšanom stanju. Osim ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje, na uzorcima je mjerena tvrdoća po presjeku od ruba prema jezgri. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provedeno je u Laboratoriju za tribologiju, a mjerenje tvrdoće provedeno je u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Dobiveni rezultati su kvantitativni pokazatelji otpornosti ispitivanih čelika na trošenje abrazijom.

1. UVOD

Topničko naoružanje predstavlja izuzetno značajan skup sredstava ratne tehnike. Klasična i raketna topnička oružja u modernoj vojsci predstavljaju najmasovnije naoružanje poslije streljačkog naoružanja [1].

Namjena topničkog naoružanja je raznovrsna: uništavanje žive sile, uništavanje bojnih sredstava, razaranje objekata i utvrda itd. Prva topnička oružja pojavila su se početkom 14. stoljeća, kada je otkriven crni barut čijim se izgaranjem oslobađala energija pomoću koje se izbacivao projektil. Na početku projektili su bile kamene ili metalne kugle, a oružja su bila u obliku drvenih okovanih cijevi, različitih promjera i dužina. Cijevi su imale zatvoreno dno, s provrtom za fitilj za paljenje baruta. Ovakva oružja imala su malen domet, a cijev je usmjeravana po pravcu vizualno, jer tada nisu postojale ciljničke naprave. Preciznost i moć ovih oružja bile su vrlo male [1].

U 15. stoljeću dolazi do masovnije i organiziranije proizvodnje topničkih oružja. Cijevi su se izrađivale od bronce ili željeza i postavljale su se na pokretna postolja nazvana lafeti. Ciljničke naprave i mehanizmi za usmjeravanje oružja prema cilju počeli su se primjenjivati u 17. stoljeću. Sve do sredine 19. stoljeća topnička oružja su rađena s glatkom cijevi. Oko 1880. godine pronađen je malodimni barut čija je toplinska moć bila puno veća u odnosu na moć crnog baruta, a fizikalna svojstva izgaranja puno povoljnija i uzrokovala su puno manje trošenje cijevi [1].

Malodimni barut omogućio je punjenje projektila većom količinom eksploziva, što je povećavalo bojnu moć oružja. Za postavljanje što veće količine eksplozivnog punjenja u tijelo projektila uz isti kalibar, koristio se izduženi, cilindrični oblik projektila jednakog promjera. Međutim takav oblik stvarao je problem stabilnosti projektila tijekom leta, jer je zbog ekscentričnog djelovanja sile otpora zraka dolazilo do tumbanja projektila na putanji, a time i promašivanja cilja ili nepravilnog pada na cilj [1].

Problem stabilizacije projektila riješen je tzv. žiroskopskom stabilizacijom, koja se postigla davanjem velikog broja okretaja projektilu oko njegove uzdužne osi. Ta rotacija je postignuta primjenom navojno ožljebljenih cijevi i projektila s vodećim prstenom, uprešanim u tijelo projektila. Vodeći prsten se pod djelovanjem sile barutnih plinova utiskivao u ožljebljenje

cijevi, pa je projektil uzdužnim kretanjem kroz cijev ujedno dobivao i rotaciju oko svoje uzdužne osi [1].

Zbog mase projektila i njegovog kretanja, na dodirnim se površinama kanala cijevi i prstenova projektila stvara pritisak i sila trenja klizanja. Pritisak i sila trenja su naročito visoki zato jer se vodeći prsten projektila utiskuje u profil žljebova i polja kanala cijevi. To izaziva abrazijsko trošenje površine kanala cijevi. Pored toga abrazijsko trošenje izazivaju i krute čestice zrnaca baruta i čađe koje nošene vrtložnim barutnim plinovima udaraju o površinu kanala cijevi pod malim kutom. O stupnju istrošenosti cijevi treba voditi stalnu brigu, jer on utječe na promjenu balističkih, a time i taktičko-tehničkih značajki oružja [2].

Znanstveno-stručna disciplina koja se sveobuhvatno bavi problemima trenja i trošenja naziva se tribologija [3].

U ovom radu biti će prikazano i objašnjeno ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje odabranih vrsta čelika za izradu cijevi topničkih oružja, koji su podvrgnuti različitim toplinsko-kemijskim postupcima. Također će biti prikazana namjena i osnovne konstrukcijske značajke ožljebljenih cijevi i projektila koji se kreće kroz cijev, zatim nastajanje abrazijskog trošenja u cijevi, te načini njegovog mjerenja.

2. NAMJENA I OSNOVNE KONSTRUKCIJSKE ZNAČAJKE OŽLJEBLJENIH CIJEVI TOPNIČKIH ORUŽJA

Topničko oružje svojim paljbenim djelovanjem ispaljuje projektil čije se kretanje nakon napuštanja cijevi nastavlja po balističkoj putanji koja mora pogoditi točku cilja. Glavni nositelj paljbenog djelovanja topničkog oružja je cijev [4].

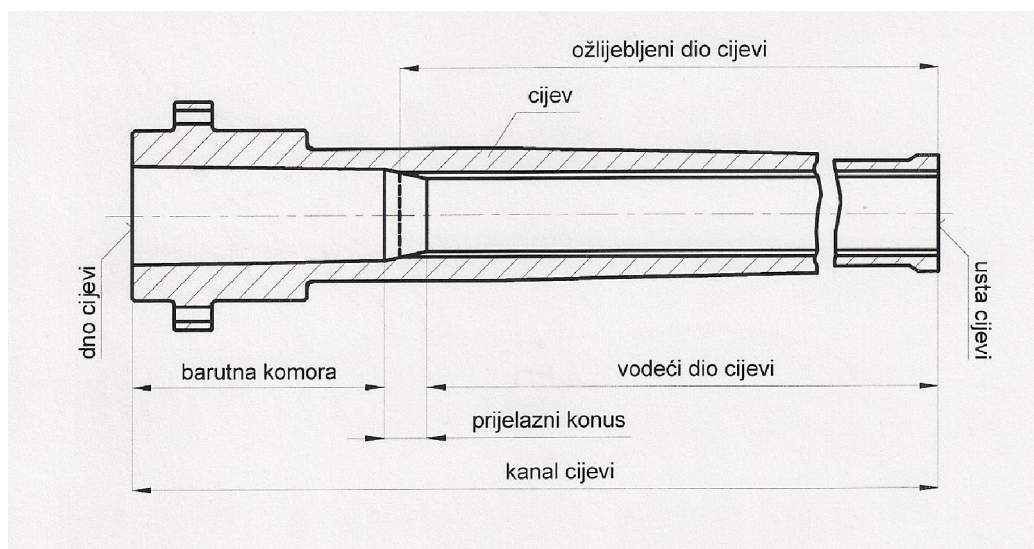
Namjena cijevi je sljedeća:

- U njoj se odvija proces opaljenja;
- U njoj projektil dobiva potrebnu početnu brzinu i rotaciju;
- Pomoću nje se projektil usmjerava prema cilju [4].

Prije opaljenja cijev se puni nabojem, koji se sastoji od projektila, barutnog punjenja i čahure [4].

Po svom konstrukcijskom obliku, cijev klasičnih topničkih oružja je cijev debelih stijenki. Njezin unutarnji otvor naziva se kanal cijevi. Uzduž kanala cijevi razlikuju se njegova tri različita oblika (sl. 2.1.):

- Barutna komora;
- Prijelazni konus;
- Vodeći dio cijevi [4].



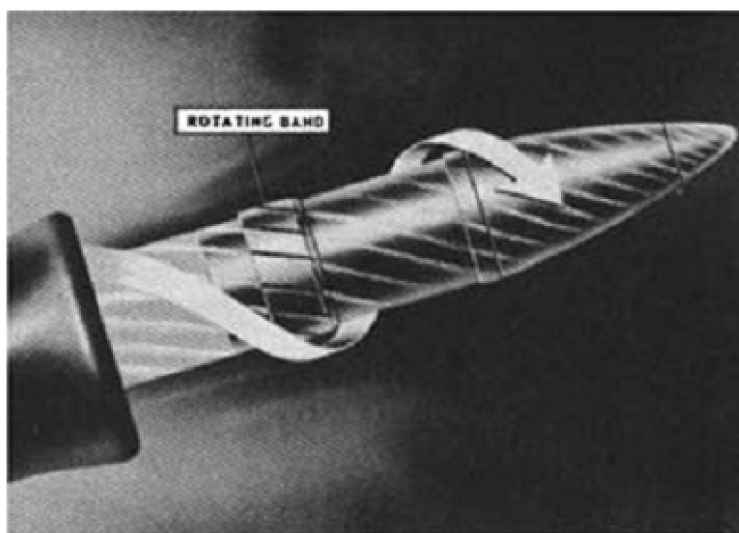
Slika 2.1. Uzdužni presjek cijevi topničkog oružja [4]

Površina kanala cijevi može biti glatka i ožljebljena. Kod oružja sa ožljebljenim kanalom cijevi, žljebovi nisu usporedni s osi kanala cijevi, nego se uvijaju pod određenim kutom uvijanja (sl. 2.2.) [4].



Slika 2.2. Kanal ožljebljene cijevi [5]

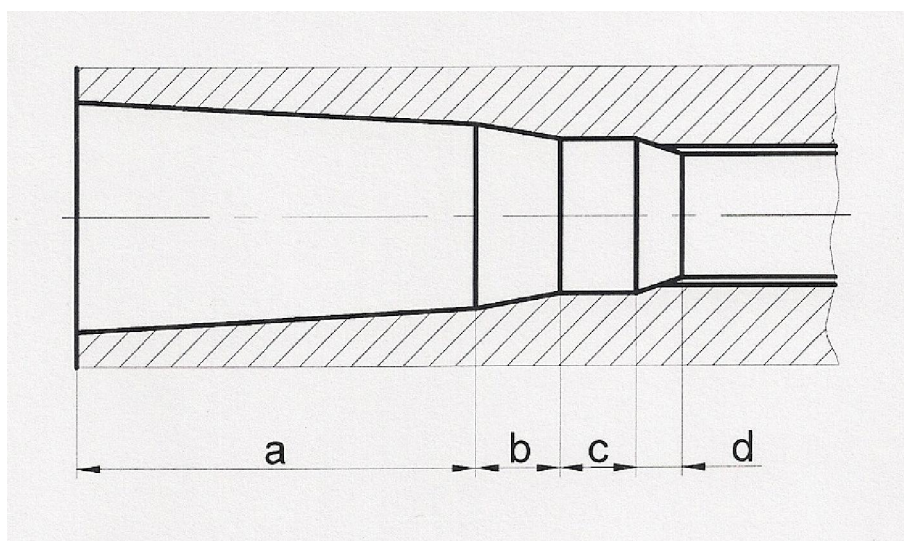
Pri zahvatu vodećeg prstena projektila s ovakvim profilom cijevi, projektil postiže rotaciju oko svoje uzdužne osi prilikom pravocrnog kretanja kroz cijev (sl. 2.3.) [4].



Slika 2.3. Rotacija projektila pri izlasku iz ožljebljene cijevi [5]

Kako se povećava pravocrtna brzina projektila, tako raste i njegova kutna brzina oko uzdužne osi, čime se ostvaruje žiroskopska stabilizacija prilikom kretanja po vanjskom dijelu balističke putanje [4].

Barutna komora je zadnji, glatki dio kanala cijevi. Namijenjena je za smještaj naboja i početno izgaranje barutnog punjenja. Kod većine topničkih oružja barutno se punjenje nalazi u mjedenoj čahuri, a kod nekih se ono nalazi u platnenim vrećicama i u njima se izravno ulaže u barutnu komoru, iza dna projektila. Ovisno o tome koristi li se naboj s čahurom ili bez nje, odnosno jesu li čahura i projektil čvrsto sjedinjeni ili nisu, barutna komora ima odgovarajući konstrukcijski oblik. Barutna komora za naboj s čahurom je blagog konusnog oblika (sl. 2.4.) [4].

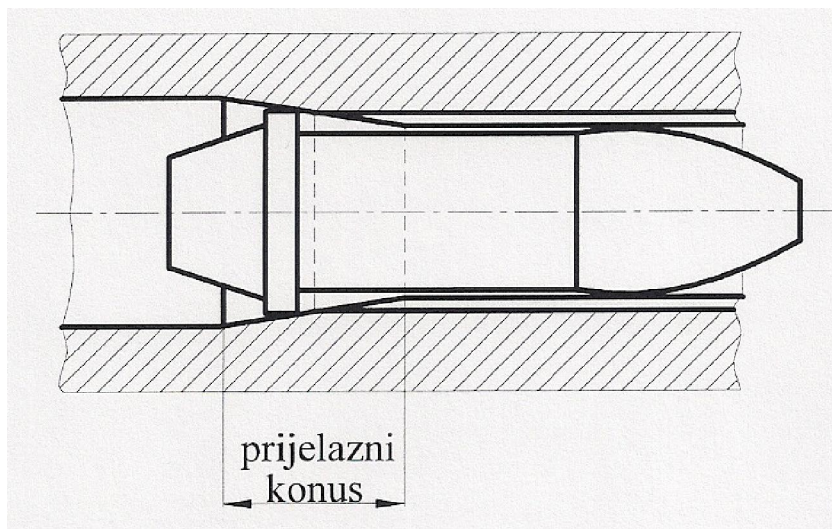


Slika 2.4. Barutna komora za naboj s čahurom: a) osnovni konus, b) prednji konus, c) cilindrični dio, d) prijelazni konus [4]

Koničnost osnovnog konusa barutne komore je od $1/60$ do $1/120$, a prednjeg konusa od $1/10$ do $1/20$ [6]. Konusni oblik barutne komore olakšava punjenje cijevi i izbacivanje prazne čahure nakon paljenja [4].

Prijelazni konus je dio kanala cijevi između barutne komore i vodećeg dijela cijevi (sl. 2.5.) i njegova je osnovna namjena osigurati postupno uvođenje projektila u vodeći dio cijevi, odnosno postupno urezivanje vodećeg prstena projektila u ožljebljeni profil kanala cijevi. Kod dvodjelnog naboja, gdje je projektil odvojen od čahure, kao i kod naboja bez čahure,

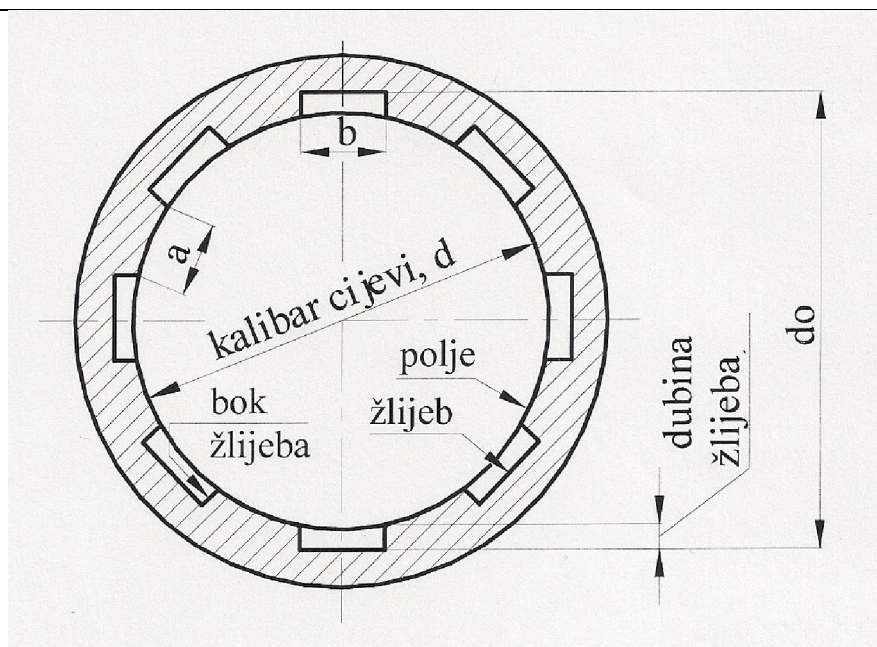
prijelazni konus osigurava točan i uvijek jednak položaj projektila u cijevi prije opaljenja, a time i jednak balistički volumen barutne komore. Kod ožljebljenih cijevi prijelazni konus je na prvoj trećini svoje duljine gladak, a zatim počinje urezivanje žljebova. Dubina žljebova postupno raste, tako da na kraju prijelaznog konusa žljebovi postižu punu konstrukcijsku dubinu [4].



Slika 2.5. Prijelazni konus [4]

Tlak barutnih plinova kojim će se postići utiskivanje vodećeg prstena projektila u ožljebljenje prijelaznog konusa ne smije biti prevelik, jer u protivnom bi došlo do smicanja vodećeg prstena s košuljice projektila. S druge strane, prilikom punjenja treba izbjeći veće odstupanje položaja projektila u smjeru uzdužne osi cijevi. Zbog toga prijelazni konus ne smije biti niti prestrm, a niti preblag [4]. Računski i praktično je utvrđeno da u cilju zadovoljavanja ovih kompromisnih uvjeta najpovoljnija vrijednost prijelaznog konusa iznosi 1:10 do 1:20 [6].

Vodeći dio cijevi je dio cijevi od prijelaznog konusa do usta cijevi. Kod većine oružja je ožljebljen, a postoje i oružja s glatkom cijevi. Na poprečnom presjeku vodećeg dijela ožljebljene cijevi uočavaju se polja i žljebovi (sl. 2.6.) [4].



Slika 2.6. Poprečni presjek vodećeg dijela cijevi [4]

Promjer koji je mjeran između dva nasuprotna polja naziva se kalibar cijevi, **d**. Broj žljebova obično je razmjernan kalibru, a mora biti djeljiv s 4 ili 8, što je uvjetovano brojem noževa na glavi alata za urezivanje žljebova [4].

Ukupna širina polja i žlijeba najčešće iznosi: $a + b = (8 \div 11)$ mm. Odnos ovih širina ovisi o početnoj brzini projektila, a kreće se u granicama:

- $1,5a < b < 3a$ - za oružja kod kojih je početna brzina projektila do 800 m/s;
- $a < b < 2a$ - za oružja kod kojih je početna brzina projektila veća od 800 m/s [6].

Dubina žlijeba **h** izražena pomoću kalibra cijevi **d** iznosi:

- $h = (0,01 \text{ do } 0,015) d$ - za oružja čija je početna brzina projektila do 800 m/s;
- $h = (0,015 \text{ do } 0,04) d$ - za oružja čija je početna brzina projektila veća od 800 m/s [6].

Kada bi se cijev razrezala po jednoj izvodnici i cilindrični kanal cijevi razvio u ravninu x-y, vodeći dio cijevi bio bi prikazan u obliku pravokutnika čija je ukupna duljina **l_u** jednaka duljini vodećeg dijela cijevi, a visina pravokutnika jednaka je opsegu kalibra **dπ** (sl. 2.7.) [4].

Veličina **l** na slici 2.7. predstavlja apsolutnu duljinu koraka žlijeba mjerenu na osi kanala cijevi. Pri pomaku za ovu duljinu, projektil napravi jedan puni okretaj oko svoje uzdužne osi.

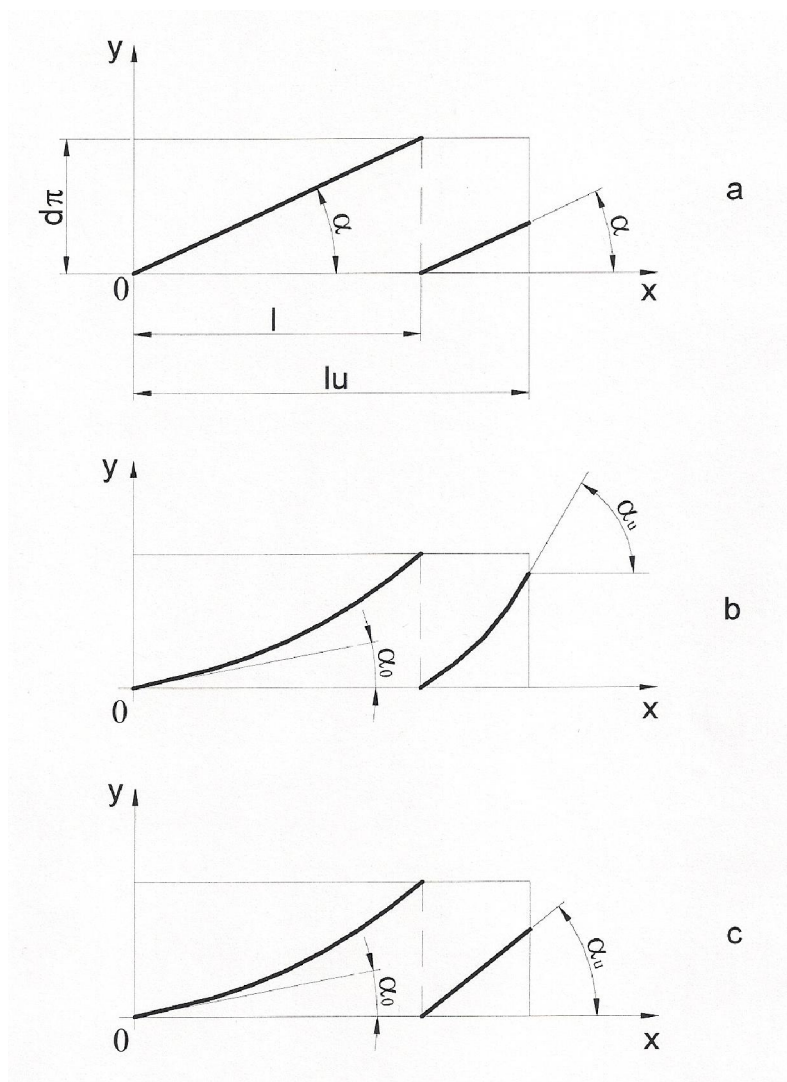
Apsolutna duljina koraka žlijeba važna je značajka za analizu utjecaja kuta uvijanja žlijeba na žiroskopsku stabilizaciju projektila i naprezanje cijevi. Odnos l/d naziva se relativnom duljinom koraka žlijeba i označava se simbolom ε . Prema slici 2.7. vidi se da je apsolutna duljina koraka žlijeba l jednaka:

$$l = \pi d / \tan \alpha \quad (1)$$

Iz toga slijedi da je relativna duljina koraka žlijeba:

$$\varepsilon = l/d = \pi / \tan \alpha \quad (2)$$

Dakle, relativna duljina koraka žlijeba ovisi samo o kutu uvijanja žlijeba α .



Slika 2.7. Žlijeb cijevi razvijen u ravnini x-y: a) konstantan kut uvijanja, b) progresivan kut uvijanja, c) kombiniran kut uvijanja [4]

Kutna brzina vrtnje projektila oko uzdužne osi obrnuto je proporcionalna relativnoj duljini koraka žlijeba ε na ustima cijevi, a kod topničkih oružja ona doseže do nekoliko tisuća radijana u sekundi. Od relativne duljine koraka žlijeba ovisi i opterećenje radne strane žlijeba. Što je ova duljina manja, pritisak vodećeg prstena na radni bok žlijeba je veći [4].

Kut uvijanja žljebova α može biti: konstantan, progresivan i kombiniran. Ovisno o tome, žlijeb razvijen u ravnini x-y prikazuje se kao pravac, parabola ili kombinacija parabole i pravca [4].

Konstantan kut uvijanja primjenjuje se onda kada je veličina kuta od 5 do 7 stupnjeva. Ako projektil mora imati veliki broj okretaja pri napuštanju usta cijevi, a njegova početna brzina je relativno mala, visok stupanj rotacije postiže se postupnim porastom kuta uvijanja žljebova. Kut uvijanja raste od početne vrijednosti $\alpha_0 = 0^\circ$ do 3° , do maksimalne vrijednosti na ustima cijevi $\alpha_u = 7^\circ$ do 10° . Progresivno se uvijanje najčešće primjenjuje kod haubica i brdskih topova koji imaju kratke cijevi i male početne brzine projektila [4].

Kombinirano uvijanje se obično primjenjuje kod dalekometnih topova velike moći kod kojih ja završni dio žljebova s konstantnim uvijanjem, da bi projektil bio što bolje stabiliziran u trenutku napuštanja usta cijevi [4].

Veliki kut uvijanja izaziva veliki dodirni pritisak između bokova žljebova i bokova zubaca oblikovanih na vodećem prstenu projektila. Posljedica toga je nastajanje velikih sila trenja i jako trošenje površina, kako na oblikovanom ozubljenju vodećeg prstena, tako i na bokovima navojnih žljebova. Iz toga slijedi zaključak da kut uvijanja žljebova na ustima cijevi mora biti što manji, odnosno mora biti toliki da osigura neophodnu kutnu brzinu projektila potrebnu za njegovu stabilizaciju. U praksi je potvrđeno da su najčešće vrijednosti kuta uvijanja α_u na ustima cijevi oko 6° za topove i oko 9° za haubice [4], [6].

Prema konstrukcijskoj izvedbi, cijevi topničkih oružja dijele se na jednodjelne i višedjelne. Jednodjelne mogu biti ojačane i samoojačane, dok višedjelne mogu biti ojačane, s košuljicom i s omotačem [4].

3. MJERENJE ISTROŠENOSTI CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA

Tijekom uporabe oružja treba uvijek voditi brigu o stupnju istrošenosti cijevi kako bi se moglo zaključiti kakve su promjene nastale na oružju u balističkom smislu. Poznavanje početne brzine projektila na svakom stupnju istrošenosti cijevi neophodno je za izvršitelja gađanja, kako bi mogli provesti potrebnu korekciju elemenata za usmjeravanje oružja. Kako se povećava stupanj istrošenosti cijevi, tako pada početna brzina projektila, a s njome i domet i preciznost oružja.

Zbog toga se postavljaju glavna obilježja radne sposobnosti cijevi topničkog oružja, a to su:

- Povećanje kalibra cijevi;
- Produženje barutne komore;
- Stanje površine kanala cijevi;
- Broj izvršenih opaljenja;
- Savijenost cijevi [7].

Provjerom i kvantificiranjem ovih obilježja utvrđuje se stupanj istrošenosti cijevi, njezin preostali eksploatacijski resurs, te opseg i način predstojećeg održavanja i planskog popravka. Pored glavnih, postoje i pomoćna obilježja koja određuju radnu sposobnost cijevi. To su:

- Ispravnost plinske kočnice;
- Učvršćenost plinske kočnice;
- Napuhnutost cijevi;
- Oštećenja na vanjskoj površini cijevi [7].

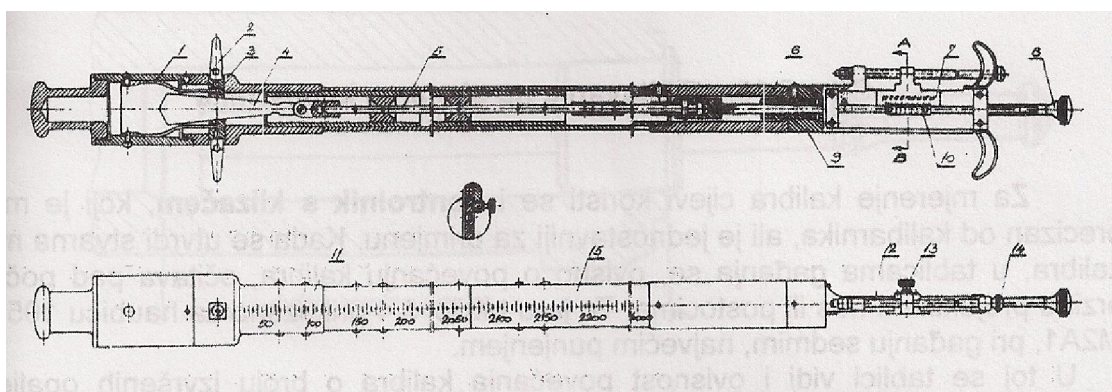
Koja će se od ovih obilježja primijeniti, ovisi o tehničkim značajkama oružja, konstrukciji, načinu uporabe, uvjetima uporabe itd. [7].

Za utvrđivanje stupnja istrošenosti cijevi topničkih oružja primjenjuju se sljedeći postupci:

- Mjerenje povećanja kalibra cijevi;
- Mjerenje produženja barutne komore;
- Vizualni pregled kanala i vanjske površine cijevi;
- Usporedba broja izvršenih opaljenja s predviđenim životom cijevi;
- Provjera savijenosti cijevi [7].

3.1. Mjerenje povećanja kalibra cijevi

Povećanje kalibra cijevi mjeri se kalibarnikom ili mikrometarskom zvijezdom (sl. 3.1.). To je uređaj za mjerenje unutarnjih promjera dugačkih glatkih i ožljebljenih provrta. Može biti mehaničkog, optičkog, pneumatskog i elektromehaničkog tipa [7].



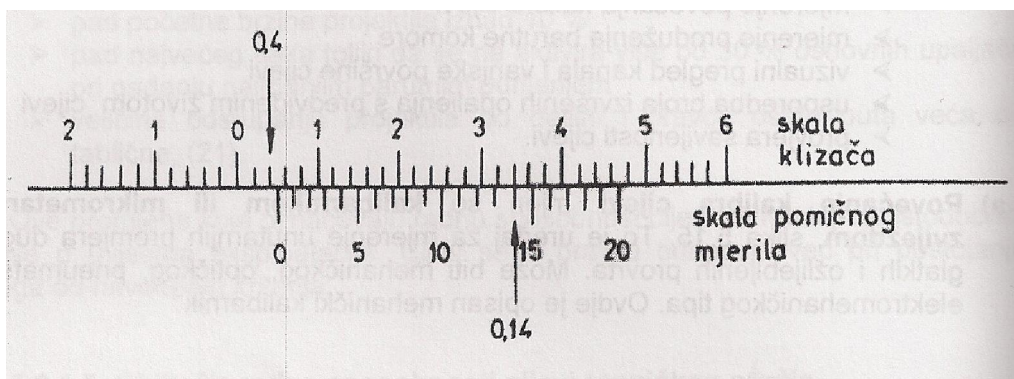
Slika 3.1. Kalibarnik ili mikrometarska zvijezda [8]: 1-lisnata opruga, 2-mjerni trn, 3-mjerna glava, 4-konus, 5-mjerni štap, 6-srednja spojnica, 7-skala klizača, 8-ručica, 9-zadnja spojnica, 10-skala pomičnog mjerila, 11-prednja spojnica, 12-mikrometarski vijak, 13-pričvrсни vijak, 14-ušice, 15-tijelo

Kalibarnikom ili mikrometarskom zvijezdom se ne utvrđuje apsolutna mjera kalibra, nego se mjeri relativna razlika između nazivnog i stvarnog promjera cijevi. Na mjernu glavu uređaja (3) postavlja se par mjernih trnova (2), (sl. 3.1.). Za određeni kalibar se uzimaju trnovi odgovarajuće veličine, a razmak njihovih vrhova se podešava pomoću etalona na nazivnu mjeru kalibra d . Skale uređaja, pomičnu (klizača) i nepomičnu (pomičnog mjerila), treba namjestiti tako da se nulti podjeljci na obje skale međusobno poklapaju [7].

Duž tijela kalibarnika treba postaviti drvene oslone prstene koji se nalaze u kompletu mjernog instrumenta, da bi se spriječilo savijanje dugačkoga tijela instrumenta. Zatim se uređaj provuče kroz cijev, tako da se strana s mjernim skalama uvodi od barutne komore prema ustima cijevi. Ako je cijev ožljebljena, vrhovi mjernih trnova moraju biti postavljeni između dva nasuprotna polja. Mjerodavna dimenzija biti će izmjerena na mjestu najveće istrošenosti cijevi, a to je na ožljebljenju neposredno iza prijelaznog konusa. Mjesto mjerenja je točno određeno pripadajućim tehničkim pravilom za svako oružje [7].

Nakon postavljanja uređaja u cijev treba povući do kraja ručicu (8), a s njome i pomičnu skalu mjerila. Pomak nule ove skale prema nuli nepomične skale predstavlja povećanje stvarne mjere kalibra cijevi u odnosu na njegovu nazivnu mjeru [7].

Prema slici 3.2. jedan podjeljak na nepomičnoj skali odgovara povećanju promjera od 0,2 mm. Na pomičnoj skali jedan podjeljak označava 0,01 mm. Za prikazani položaj skala, povećanje kalibra je: $0,4 + 0,14 = 0,54$ mm [7].



Slika 3.2. Očitavanje na skalama kalibarnika [7]

Za mjerenje kalibra cijevi koristi se i kontrolnik s klizačem koji je manje precizan od kalibarnika, ali je jednostavniji za primjenu. Kada se utvrdi stvarna mjera kalibra, u tablicama gađanja se, ovisno o povećanju kalibra, očitava pad početne brzine projektila u m/s ili postotcima. To je prikazano u tablici 3.1. za haubicu 105 mm M2A1 pri gađanju sedmim, najvećim punjenjem [7].

Tablica 3.1. Opadanje početne brzine projektila v_0 i balistički život cijevi haubice 105 mm M2A1 [9]

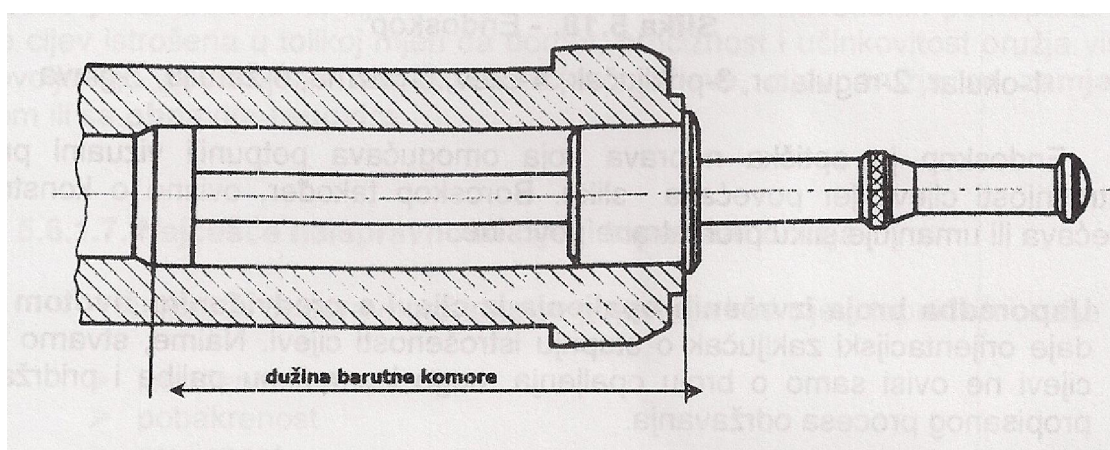
Kalibar [mm]	Opadanje v_0 [m/s] za sedmo punjenje	Opadanje v_0 [%]	Ostatak života cijevi (broj opaljenja)
105,004	0	0	20 000
105,105	1,22	0,26	19 500
105,232	2,13	0,45	19 000
105,308	3,05	0,65	18 500
105,410	3,66	0,78	18 000
105,537	4,57	0,97	17 000
105,664	5,49	1,16	16 000
105,766	6,40	1,36	15 000
105,862	7,00	1,48	14 000
106,045	7,90	1,67	12 000
106,197	9,10	1,93	10 000
106,324	10,10	2,14	8000
106,426	10,70	2,27	6000
106,533	11,00	2,33	4000
106,680	11,30	2,39	2000
106,882	11,60	2,46	0

U prethodnoj tablici vidi se i ovisnost povećana kalibra o broju izvršenih opaljenja, odnosno preostali iskoristivi resurs cijevi za određenu mjeru kalibra.

3.2. Mjerenje produženja barutne komore

Mjerenje produženja barutne komore također se izvodi radi utvrđivanja pada početne brzine projektila prema podacima u tablicama gađanja. Ovaj postupak se može provesti mjerenjem razmaka od dna čahure naboja do dna projektila koji je prethodno uz normalnu ručnu silu nabijen u cijev. Pri tome čahura mora biti bez inicijalne kapsule, a projektil bez upaljača. Mjerna šipka se provlači kroz otvor za smještaj inicijalne kapsule, od dna čahure do dna projektila. Dakle, mjeri se dubina ulaska projektila u cijev [7].

Na slici 3.3. prikazan je pribor jednostavne konstrukcije, kojim se može izvesti mjerenje. Pribor se sastoji od držača i mjerne letve sa skalom.



Slika 3.3. Mjerenje produženja barutne komore [7]

Na temelju izmjerenog produženja barutne komore, iz tablica gađanja se za pripadajuće oružje očitava pad početne brzine projektila. Tablica 3.2. to prikazuje za top 130 mm M46.

Tablica 3.2. Opadanje početne brzine projektila v_0 ovisno o produženju barutne komore topa 13 mm M46 [10]

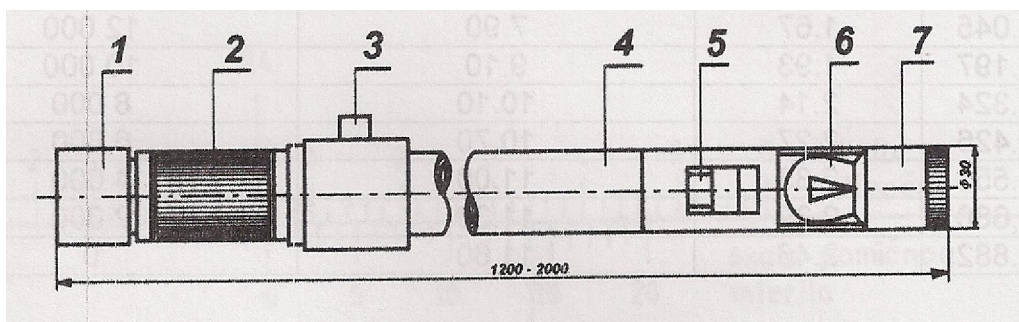
Produženje barutne komore [mm]	10	26	53	210	600	675	706	732	757
Opadanje v_0 [%] (za puno punjenje)	1	2	3	4	5	6	7	8	9

Iz tablice je vidljivo da produženje barutne komore poprima relativno velike iznose, što znači da se prijelazni konus za istu mjeru pomiče prema ustima cijevi. Do toga dolazi zbog malog kuta prijelaznog konusa, pa relativno mala istrošenost po debljini sloja materijala izaziva geometrijski znatan pomak oblika konusa prema naprijed.

3.3. Vizualni pregled kanala i vanjske površine cijevi

Vizualni pregled kanala i vanjske površine cijevi izvodi se kako bi se otkrili razni tragovi trošenja i oštećenja cijevi: korozije, pobakrivanja, istrošenosti žljebova i polja, ljuštenja kromiranih površina, pukotina, riseva, napuhnutosti, udubljenja, lomova i dr. Za ovaj pregled a i za ostala mjerenja, najvažnije je da cijev mora biti temeljito očišćena [7].

Osim golom okom, vizualni pregled kanala cijevi može se izvesti i pomoću elektro-optičkog pribora. To u najjednostavnijoj izvedbi može biti poluga s ogledalom postavljenim pod 45° i električnom žaruljom za osvjetljenje. Za detaljan pregled kanala cijevi koriste se optičke cijevi s električnim osvjetljenjem, kao što su endoskop (sl. 3.4.) i boroskop [7].



Slika 3.4. Endoskop: 1-okular, 2-regulator, 3-priključak, 4-cijev, 5-prizma, 6-žarulja, 7-glava [7]

Endoskop je optička naprava koja omogućava potpuniji vizualni pregled unutrašnjosti cijevi, jer povećava sliku, a omogućava i snimanje površine. Boroskop također, ovisno o konstrukciji, povećava ili umanjuje sliku promatrane površine [7].

3.4. Usporedba broja izvršenih opaljenja s predviđenim životom cijevi

Usporedba broja izvršenih opaljenja iz cijevi s predviđenim životom cijevi daje orijentacijski zaključak o stupnju istrošenosti cijevi. Naime, stvarno stanje cijevi ne ovisi samo o broju opaljenja, nego i o režimu paljbe i pridržavanju propisanog procesa održavanja [7].

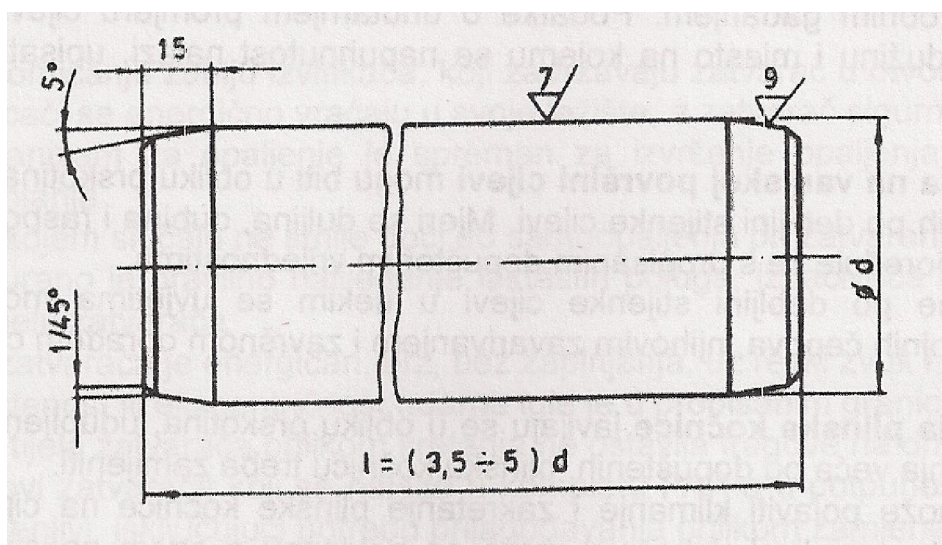
Kod oružja s višedjelnim barutnim punjenjem uveden je ekvivalentni broj bojnih naboja (EBN), tj. naboja s najvećim punjenjem. Poznato je, naime, da naboji s manjim punjenjem razmjerno manje troše cijev. Na primjer, život cijevi haubice 105 mm M2A1 je dvadeset tisuća opaljenja pri gađanju s najvećim, sedmim punjenjem. Međutim, u smislu djelovanja na intenzitet trošenja cijevi, jednom opaljenju sa sedmim punjenjem odgovaraju tri opaljenja sa šestim punjenjem i deset opaljenja s petim punjenjem ili čak sto dvadeset opaljenja s najmanjim, prvim punjenjem [7].

Barutna punjenja treba primjenjivati racionalno: cilj treba gađati s najmanjim barutnim punjenjem s kojim će projektil sigurno dosegnuti cilj. Nepotrebno povećanje barutnog punjena ne povećava učinkovitost gađanja, ali značajno povećava trošenje cijevi. Po završetku svakog gađanja broj svih izvršenih opaljenja preračunava se na broj opaljenja s punim punjenjem, dakle, na ekvivalentni broj bojnih naboja i taj se podatak upisuje u tehničku knjižicu oružja [11].

3.5. Provjera savijenosti cijevi

Provjera savijenosti cijevi također je propisana kod nekih topničkih oružja. Pojava savijenosti je naročito izražena kod protuoklopnih topova kao oružja s velikom dužinom cijevi (preko 50 kalibara) [7].

Savijenost se mjeri optičkim ili laserskim uređajem. U postrojbama se savijenost može jednostavno provjeriti cilindričnim kontrolnikom (sl. 3.5.), duljine $l = (3.5 \div 5) d$, izrađenim od čelika [7].



Slika 3.5. Kontrolnik za provjeru savijenosti cijevi [8]

Nazivni promjer cilindra **d** odgovara nazivnoj mjeri promjera kanala cijevi, umanjenoj za 1/2 tolerancije mjere kalibra cijevi. Tako obrađen, kontrolnik mora slobodno proći kroz kanal cijevi. Kada se bilo kojim od navedenih postupaka utvrdi da je cijev istrošena u tolikoj mjeri da domet, preciznost i učinkovitost oružja više ne zadovoljavaju postavljene taktičko-tehničke zahtjeve, cijev oružja se zamjenjuje novom ili se obnavlja-renovira [7].

Da bi se izbjegle radijalne oscilacije projektila i neravnomjerno trošenje polja u kanalu cijevi, potrebno je osigurati visoku točnost izradbe kanala cijevi i centrirajućih dijelova na košuljici projektila [12].

Minimalna dijametralna zračnost prema Gabeadu iznosi [12]:

$$\Delta_{\min} = d_{\min} - d_{\max} = 4,7 d [\mu\text{m}] \quad \text{za } d \leq 75 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\min} = d_{\min} - d_{\max} = 250 + 1,3 d [\mu\text{m}] \quad \text{za } 75 < d < 220 \text{ mm}$$

$$\Delta_{\min} = d_{\min} - d_{\max} = 2,43 d [\mu\text{m}] \quad \text{za } d > 220 \text{ mm}$$

Gdje su:

d - promjer kanala cijevi preko polja;

d_c - promjer centrirajućih prstenova na košuljici projektila [12].

Prema Tretjakovu, promjer centrirajućeg prstena treba biti za 0,1 do 0,25 mm manji od nazivnog promjera kanala cijevi preko polja.

Širina prednjeg centrirajućeg prstena prema Tretjakovu iznosi [12]:

$H_c = (0,15 \div 0,4) d$, za projekte malog kalibra;

$H_c = (0,1 \div 0,2) d$, za projekte srednjeg i velikog kalibra.

Širina stražnjeg centrirajućeg prstena može biti znatno veća od navedenih vrijednosti, jer se mora osigurati nalijeganje centrirajućeg prstena na polje cijevi i u uvjetima njene velike istrošenosti [12].

Vanjski promjer vodećeg prstena izračunava se formulom [12]:

$$d_p = d_o + \Delta_1 \quad (3)$$

d_o - promjer kanala cijevi preko žljebova;

$\Delta_1 = d_p - d_o$ - veličina forsiranja.

Prema A. Stamatoviću veličina forsiranja je $\Delta_1/2 = (0,0009 \div 0,012)$ d, a odnosi se na sve tipove vodećih prstenova.

Uobičajene vrijednosti forsiranja iznose $\Delta_1 = 0,1 \div 0,4$ mm.

Dozvoljena odstupanja promjera vodećih i centrirajućih prstenova daju se sa znakom "minus" i iznose [12]:

- Za vodeći prsten, od 0,2 do 0,3 mm;
- Za centrirajući prsten, od 0,1 do 0,15 mm.

Materijal vodećih prstenova topničkih rotirajućih projektila treba biti mekan, a istodobno treba imati dovoljnu žilavost u podnošenju deformacije i da u što manjoj mjeri troši cijev oružja. Do sada su za izradu vodećih prstenova primjenu našli sljedeći materijali [12]:

- Elektrolitički bakar;
- Elektrolitički bakar s dodatkom nikla;
- Elektrolitički bakar s dodatkom cinka;
- Elektrolitički bakar i niskouglični čelik (meko željezo);
- Niskouglični sintetizirani čelik (FeS);
- Čisto meko željezo (FeW);
- Plastične mase.

5. ABRAZIJSKO TROŠENJE I NJEGOVO NASTAJANJE U CIJEVI TOPNIČKOG ORUŽJA

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela zbog dinamičke veze s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Na taj se način postupno mijenja veličina i oblik tijela izloženog trošenju [7].

Istrošenost nastaje kao posljedica trošenja i ona se iskazuje u obliku gubitka materijala na površini, deformacije, promjene kvalitete materijala na površini, narušavanja kvalitete kinematičkih veza između dijelova u sklopu itd. [7].

Trenje i trošenje su međusobno povezani i moraju se promatrati istodobno, ali ipak među njima ne postoji jednoznačna veza, što znači da povećanje intenziteta trošenja nije uvijek jednako proporcionalno s povećanjem trenja [7].

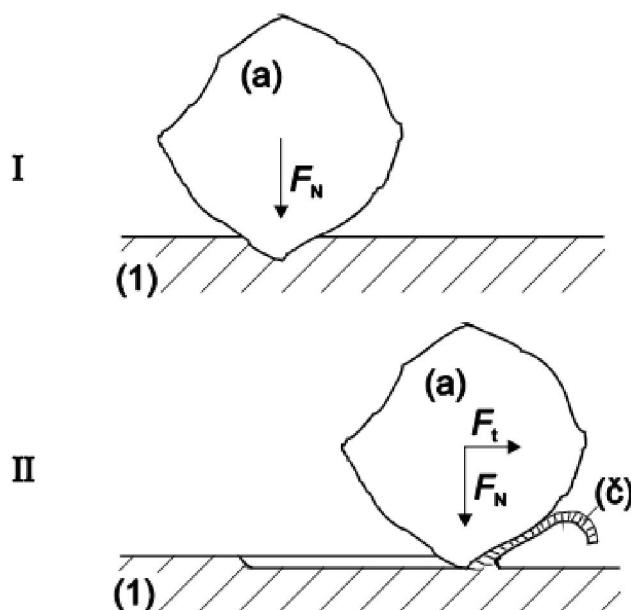
Mehanizam trošenja predstavlja slijed jediničnih događaja, gdje jedan jedinični događaj predstavlja odvajanje jedne čestice trošenja s površine. Iako postoji bezbroj različitih slučajeva trošenja, četiri su osnovna mehanizma trošenja [7]:

- Abrazija;
- Adhezija;
- Umor površine;
- Tribokorozija.

Mehanizmi trošenja prepoznaju se na temelju oblika čestica trošenja i izgleda trošenih površina. Ovi mehanizmi trošenja istodobno djeluju na topničku cijev tijekom trajanja procesa opaljenja [11].

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala, uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama [13].

Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice, s dvije faze jediničnog događaja, (sl. 5.1.).



Slika 5.1. Jedinični događaj abrazije [14]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

I faza - prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N .

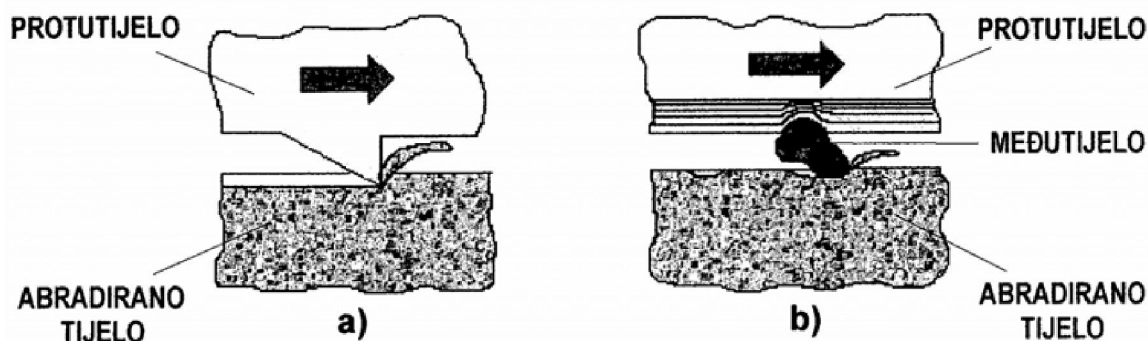
II faza - istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t .

Mehanizam abrazije može se analizirati s nekoliko različitih gledišta:

1) Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije, prikazana slikom 5.2.:

a) Abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i abrazijsko protutijelo).

b) Abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela (abrazivno tijelo i protutijelo), te međutijela (čestice) koje se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski.



Slika 5.2. Abrazija u dodiru dva tijela (a) i tri tijela (b) [15]

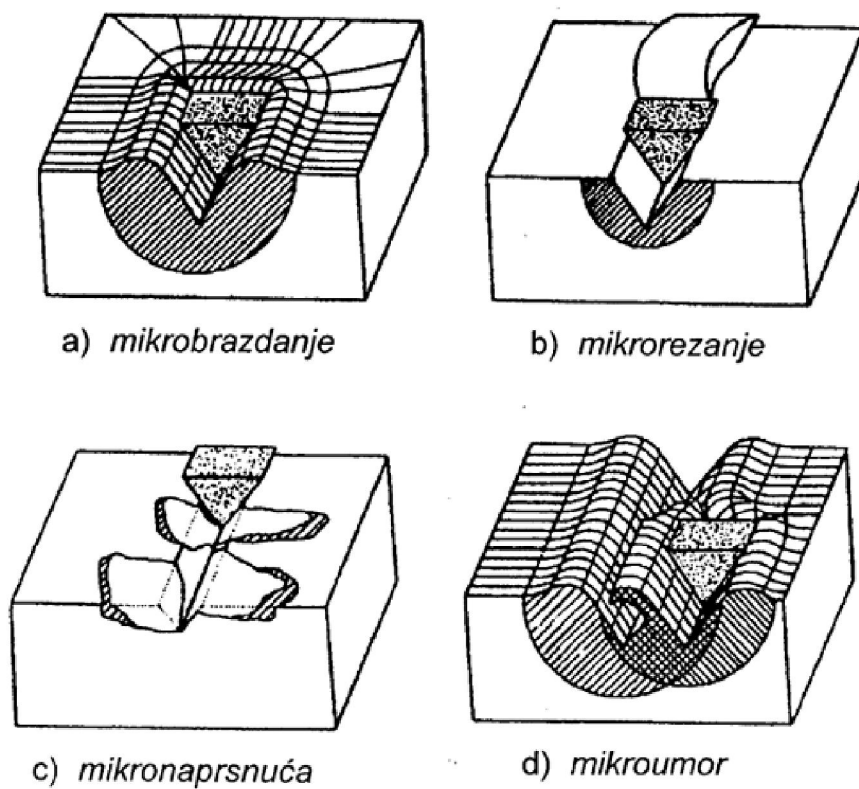
2) Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine to su:

a) Mikrobrazdanje (slika 5.3.a) – odnošenje materijala proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja. U idealnom slučaju mikrobrazdanja jedna abrazijska čestica neće proizvesti produkte trošenja nego će materijal biti potisnut u stranu u obliku bočnih “grebena”.

b) Mikrorezanje (slika 5.3.b) – odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice.

c) Mikronaprsnuća (slika 5.3.c) – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina. Pri tome se s površine odnose veliki djelići materijala.

d) Mikroumor (slika 5.3.d) – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem. Materijal je izložen trenutnim deformacijama uslijed čega nastaju mikropukotine koje se zatim šire i koje u konačnici uzrokuju odvajanje dijelova materijala trošene površine. Mikroumor može nastati i kao posljedica višestrukog učestalog mehanizma mikrobrazdanja.



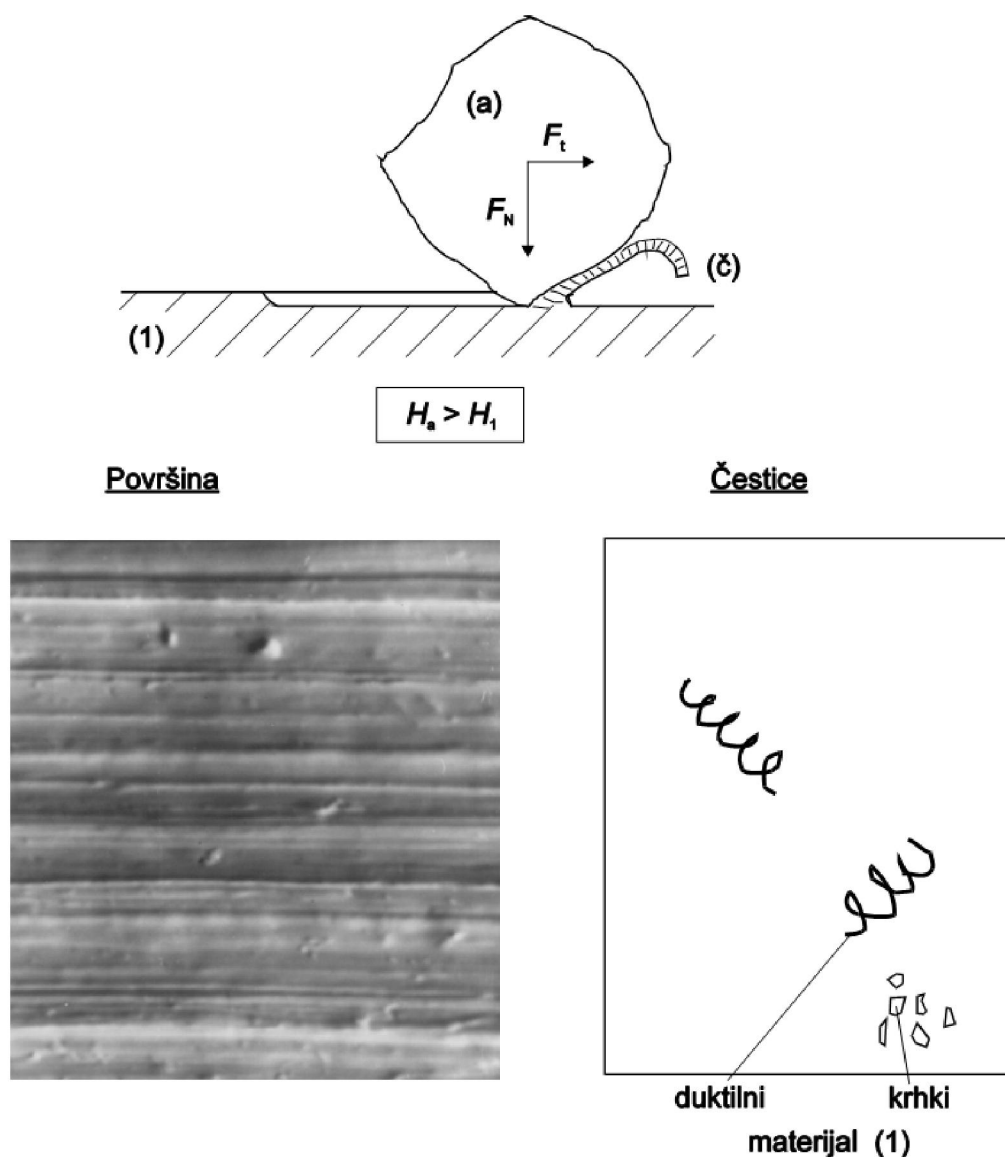
Slika 5.3. Shematski prikaz mikromehanizama trošenja materijala [16]

3) Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala moguća su tri praktična slučaja:

- “Čista” abrazija;
- Selektivna abrazija;
- “Nulta” abrazija.

5.1. “Čista” abrazija

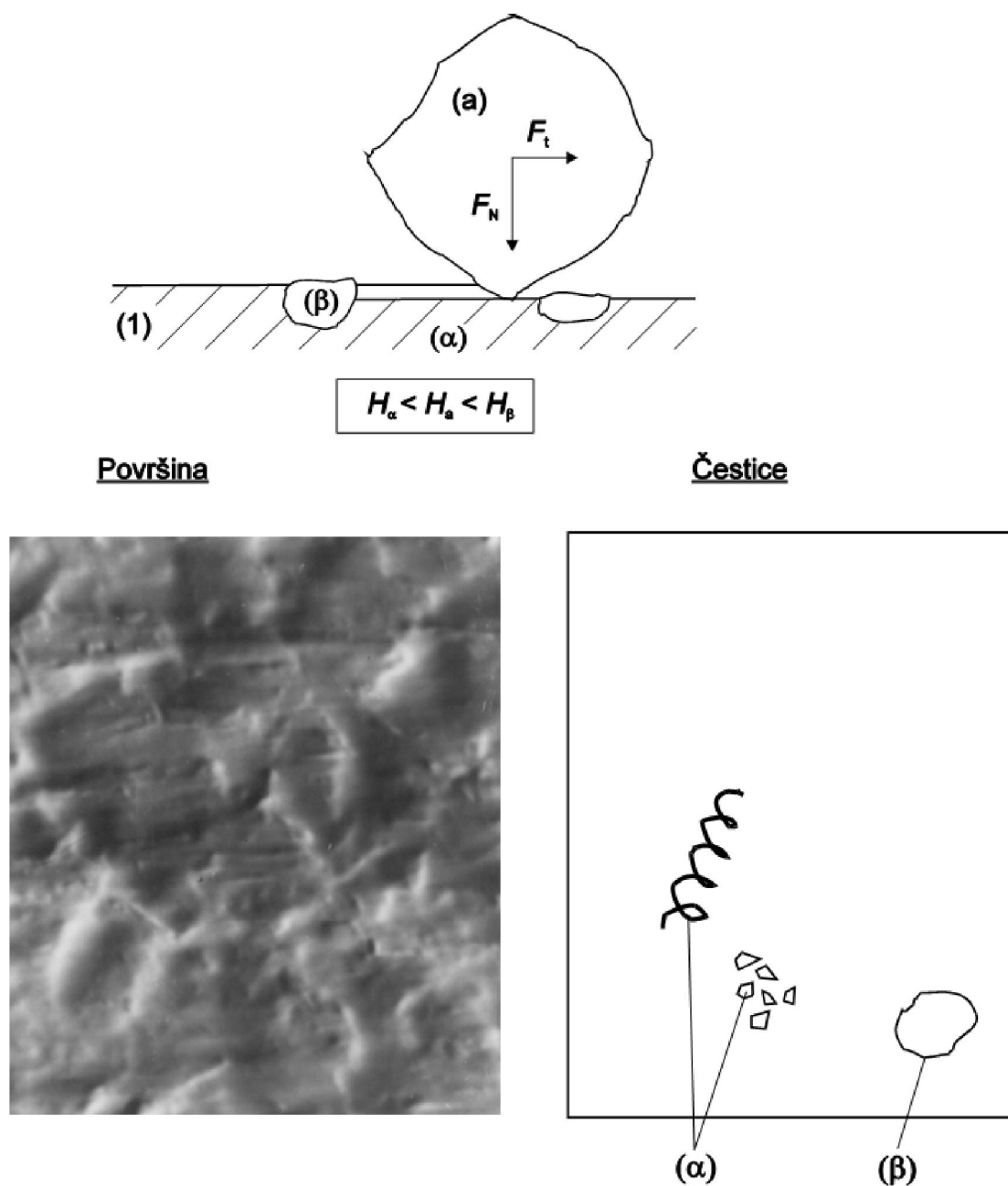
“Čista” abrazija djeluje kada je tvrdoća abraziva (a) veća od tvrdoće trošene podloge (1). Površina je izbrazdana, a čestice trošenja su oblika spiralne strugotine u slučaju kada je abradirani materijal duktilan, odnosno lomljene strugotine, kada je abradirani materijal krhak (slika 5.4.).



Slika 5.4. “Čista” abrazija [14]

5.2. Selektivna abrazija

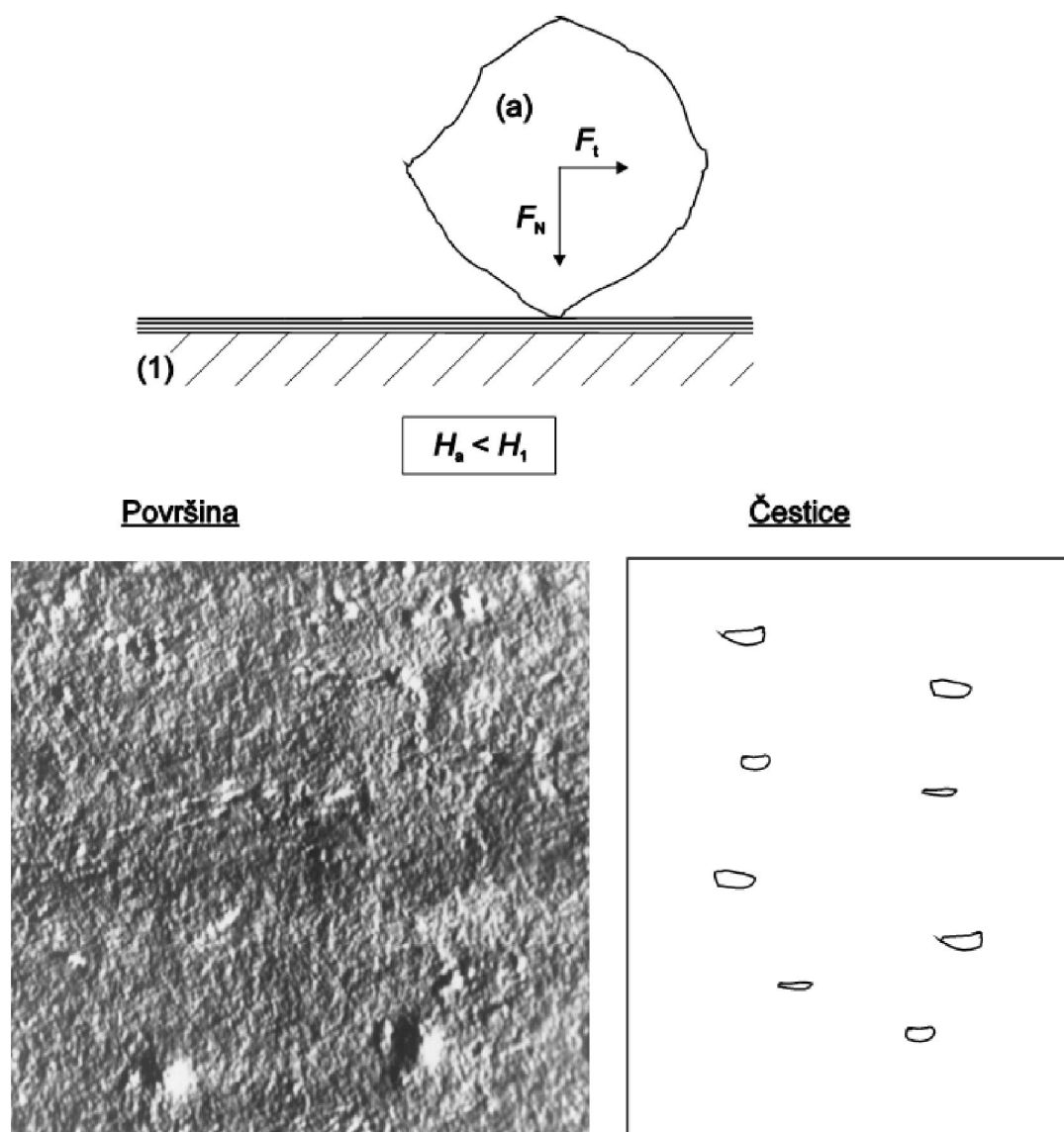
Selektivna abrazija djeluje kada u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva. Abraziv “reže” samo zahvaćeni sloj mekše faze. Površina je izbrazdana, s prekidima na mjestima gdje se na površini nalaze zrna ili trake tvrde faze (slika 5.5.).



Slika 5.5. Selektivna abrazija [14]

5.3. “Nulta” abrazija

“Nulta” abrazija nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva. Površina ima polirani izgled, a čestice trošenja trebale bi biti sitne ljuskice koje potječu od vanjskoga graničnoga sloja. Nulta abrazija najčešće se javlja na površinskim slojevima dobivenim različitim postupcima oplemenjivanja površine (boriranje, vanadiranje, CVD, PVD, itd.) (slika 5.6.).



Slika 5.6. “Nulta” abrazija [14]

U praksi se želi postići selektivna, ili čak nulta abrazija, koje rezultiraju manjim intenzitetom abrazijskog trošenja nego čista abrazija. Ovo se ostvaruje odgovarajućom mikrotvrdoćom površinskih slojeva abradiranog materijala [4].

5.4. Abrazijsko trošenje cijevi topničkog oružja

Cijev topničkog oružja izložena je vrlo teškim uvjetima eksploatacije, što se posebno odnosi na površinu kanala cijevi, bilo glatku ili ožljebljenu. Prilikom procesa opaljenja, u kanalu cijevi odvijaju se izrazito dinamički kemijsko - fizikalni procesi, čije se djelovanje očitava na unutarnjoj površini cijevi, ali i po cijeloj dubini poprečnog presjeka cijevi. Vrlo brzim izgaranjem baruta, u kratkom vremenu se razvija vrlo velika količina barutnih plinova. Zbog zatvorenog i malog prostora, njihov tlak naglo raste, pa u jednom trenutku počinje kretanje projektila. Na ustima cijevi projektil postiže predviđenu početnu brzinu v_0 . Izgaranjem baruta razvija se velika količina topline, zbog čega se na visoku temperaturu zagrijavaju i barutni plinovi i cijev oružja. Zbog mase projektila i njegovog kretanja, na dodirnim površinama nastaje pritisak i sila trenja klizanja [7].

Temperatura površinskih slojeva kanala cijevi može dosegnuti nekoliko stotina, pa čak i do 1000 °C. To dovodi do promjene strukture materijala i njegovih mehaničkih svojstava. Cijev se nejednoliko zagrijava po presjeku, što uzrokuje pojavu toplinskih naprezanja i mikropukotina, najizraženijih na površini kanala cijevi, s tendencijom pada prema vanjskim slojevima cijevi. Trošenju cijevi doprinosi i korozija izazvana djelovanjem okolne atmosfere [7].

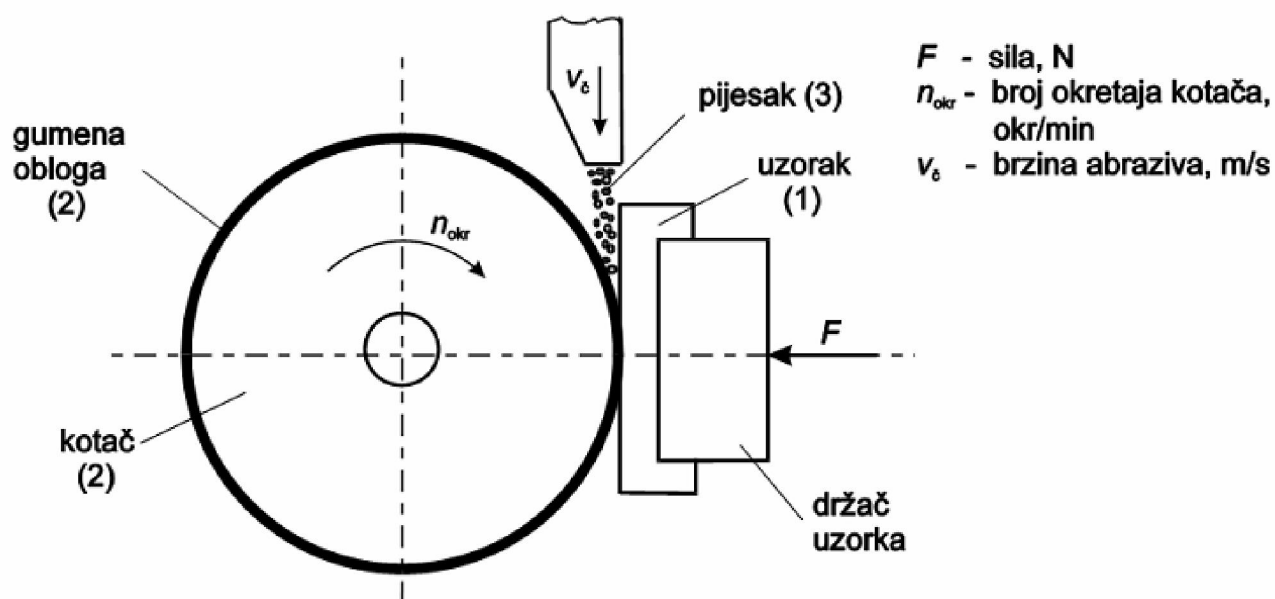
Abrazija cijevi topničkog oružja izazvana je trenjem klizanja vodećeg prstena i centrirajućeg prstena projektila po površini kanala cijevi. Materijal prstenova je mekši od abradirane površine, pa se tu radi o nultoj abraziji [4].

Abraziju cijevi izaziva i abrazivna erozija česticama gareži i zrcima baruta, kada ove čestice velikom brzinom, a pod malim kutom udaraju o površinu kanala cijevi [4].

6. ISPITIVANJE OTPORNOSTI NA ABRAZIJSKO TROŠENJE I IZBOR MATERIJALA ZA IZRADU UZORAKA

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje provodi se metodom "suhi pijesak - gumeni kotač". Postoji veći broj uređaja i metoda za ovakvu vrstu ispitivanja, ova metoda je odabrana zbog toga što već postoji veliki broj rezultata dobivenih njome, pa su moguće eventualne usporedbe. Također je dokazana dobra korelacija između rezultata dobivenih ovom metodom i rezultata iz eksploatacije [4].

Na slici 6.1. prikazana je skica uređaja "suhi pijesak - gumeni kotač" [14].



Slika 6.1. Skica uređaja "suhi pijesak - gumeni kotač" [14]

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje po metodi "suhi pijesak - gumeni kotač" izvodi se prema normi ASTM G65-94, a sastoji se od abradiranja uzorka (1) standardnim zaobljenim kvarenim pijeskom Ottawa AFS 50/70 (3). Epruveta se naslanja na kotač (2) obložen gumom tvrdoće oko 60 Shore a, a opterećena je utezima preko koljenaste poluge. Sila F iznosi 130 N ili 45 N, ovisno o varijanti postupka, a još je promjenljiv i ukupni broj okretaja kotača koji se registrira brojačem (tablica 6.1.).

Uređaj "suhi pijesak - gumeni kotač" na kojem je provedeno abrazijsko trošenje ispitnih uzoraka prikazan je na slici 6.2.

Tablica 6.1. Varijante postupka "suhi pijesak - gumeni kotač" [17]

Varijanta postupka	Sila na uzorak, N	Broj okretaja kotača
A	130	6000
B	130	2000
C	130	100
D	45	6000



Slika 6.2. Uređaj "suhi pijesak - gumeni kotač"

Vaganjem uzorka prije i poslije ispitivanja utvrđuje se gubitak mase koji se preračunava u gubitak volumena. Ova metoda omogućuje relativno rangiranje otpornosti na abrazijsko trošenje različitih materijala ako je prevladavajući mehanizam trošenja abrazija.

Sažeti opis ispitivanja “suhi pijesak - gumeni kotač” prikazan je u tablici 6.2.

Tablica 6.2. Opis ispitivanja “suhi pijesak - gumeni kotač” [18]

Svrha ispitivanja	Određivanje otpornosti na trošenje materijala na abraziju trećim tijelom
Uzorci	Ravni (površinski modificiran) uzorak (dimenzije: $\sim 76 \times 25 \times (3,2 - 12,7)$ mm), u kontaktu s rotirajućim gumenim kotačem. Abrazivne čestice su čestice zaobljenog kvarcnog pijeska standardne granulacije.
Uvjeti ispitivanja	- Brzina rotacije kotača: 200 ± 10 okr/min - Opterećenje: 45 N ili 130 N - Protok abraziva: 250 - 400 g/min
Mjerenje	- Gubitak mase - Dubina traga trošenja analizom profila
Vrsta trošenja	Abrazija pri malom naprezanju

6.1. Izbor materijala otpornih na abrazijsko trošenje

Upute za izbor materijala za dijelove izložene abraziji dane su u tablici 6.3. Pri izboru materijala, odnosno zaštitnog sloja, u obzir treba uzeti tvrdoću abraziva. Materijali s visokim udjelom tvrdih faza su krhki, pa zahtjevi za žilavošću tj. udarnom radnjom loma i tehnološkošću (rezljivost) su proturječni u odnosu na zahtjev za otpornost na abrazijsko trošenje. To proturječje prevladava se često primjenom postupaka zaštite površine od trošenja. U slučaju abrazijskog trošenja prikladni su boriranje, vanadiranje i navarivanje [18].

Tablica 6.3. Upute za izbor materijala u uvjetima abrazije [19]

Radni uvjeti	Zahtijevana svojstva	Materijal
- visoka naprezanja - udarci	- visoka žilavost - otvrdnjavanje hladnom deformacijom	- austenitni manganski čelik - guma
- niska naprezanja - klizanje	1. Visoka tvrdoća 2. Žilavost manje važna 3. Brza izmjena dijelova	- kaljeni ili drugačije otvrdnuti metalni materijali - navareni slojevi - keramika
	1. Niska cijena osnovnog materijala 2. Trajanje izmjene manje važno	- keramika - kamene pločice - beton
	1. Najveća otpornost na trošenje 2. Cijena nevažna	- volframov karbid (tvrđi metal)
- visoka naprezanja - jaki udarci	- visoka žilavost	- lijevovi i čelici - zavareni slojevi
- vlaga i korozija	- otpornost na koroziju	- korozijski postojani čelici - keramika - guma - polimeri
- niska naprezanja - sitne čestice - slaba abrazivnost čestica	- niski koeficijent trenja	- poliuretan - teflon - glatke metalne površine
- visoka temperatura	- otpornost lomu i toplinskim šokovima - opća otpornost pri povišenim temperaturama	- lijevovi i čelici legirani kromom - neke keramike
- minimalno trajanje zastoja	- laka izmjena	- bilo koji materijal koji se lako pričvršćava ili nanosi
- zakrivljene i nepravilne površine i oblici	- bilo koje ili kombinacije gornjih svojstava	- navareni slojevi - materijali koji se nanose lopaticom
- jako teški rad pri visokim temperaturama		- navareni slojevi

6.2. Izbor materijala za izradu uzoraka

Topnička cijev svojom ukupnom kvalitetom mora zadovoljiti sve složene eksploatacijske i tehnološke zahtjeve koji se na nju postavljaju. Prema tome se za izradu cijevi primjenjuju visokokvalitetni legirani čelici koji moraju imati izražena sljedeća svojstva:

- Visoku čvrstoću i granicu tečenja;
- Dobru žilavost;
- Dovoljnu tvrdoću i visoku otpornost na udarna opterećenja i trenje;
- Homogenu strukturu s malo nemetalnih uključaka;
- Visoku otpornost na kemijsko djelovanje produkata izgaranja baruta i na djelovanje atmosfere;
- Visoku udarnu radnju loma.

Za debelostijene topničke cijevi koriste se čelici koji imaju sljedeće vrijednosti mehaničkih svojstava:

- Konvencionalna granica razvlačenja, $R_{p0,2}$ od 930 do 1470 N/mm²;
- Vlačna čvrstoća, R_m od 1030 do 1780 N/mm²;
- Istezljivost, A od 8 do 20 %;
- Konačno suženje presjeka od 20 do 46 %;
- Udarna radnja loma, KU ≥ 36 J [12], [20].

Čelici za izradu cijevi sa navedenim svojstvima moraju ta svojstva zadržavati u vrlo širokom temperaturnom području, jer temperatura okoline u kojoj oružje djeluje može biti i niža od - 30 °C, dok se cijev tijekom gađanja zagrijava na temperaturu od nekoliko stotina °C. Zbog toga se za izradu cijevi primjenjuju čelici za poboljšavanje koji kaljenjem i visokim popuštanjem postižu navedena svojstva. Takvi su na primjer čelici: 32CrMo12, 30CrNiMo8 i 30NiCrMo16 [12], koji su legirani niklom, molibdenom i kromom. Svojstva poboljšanih čelika moraju biti jednolika po cijelom presjeku proizvoda, a to se postiže samo onda kada je materijal potpuno prokaljen, tj. ako je po cijelom presjeku gašen natkritičnim intenzitetom. U tom slučaju po cijelom presjeku trebalo bi biti 100% martenzita.

Nikal daje visoku čvrstoću i udarnu radnju loma, te dobru prokaljivost čelika. Naročito je izražen njegov utjecaj na postizanje visoke radnje loma na sniženim temperaturama.

Molibden također povećava čvrstoću, posebno pri povišenim temperaturama, kao i udarnu radnju loma. Također poboljšava prokaljivost čelika, a utječe i na poboljšanje strojne obradivosti.

Krom kao legirni element utječe na povećanje čvrstoće i na prokaljivost čelika. Njime se također postiže otpornost čelika prema atmosferskoj koroziji, vrućim plinovima i kiselinama.

Krom-molibdenski čelici za poboljšavanje vrlo su dobro prokaljivi i nisu skloni krhkosti popuštanja. Oni su u grupi čelika za poboljšavanje najotporniji na popuštanje, pa se primjenjuju za rad pri povišenim temperaturama do 550 °C [21].

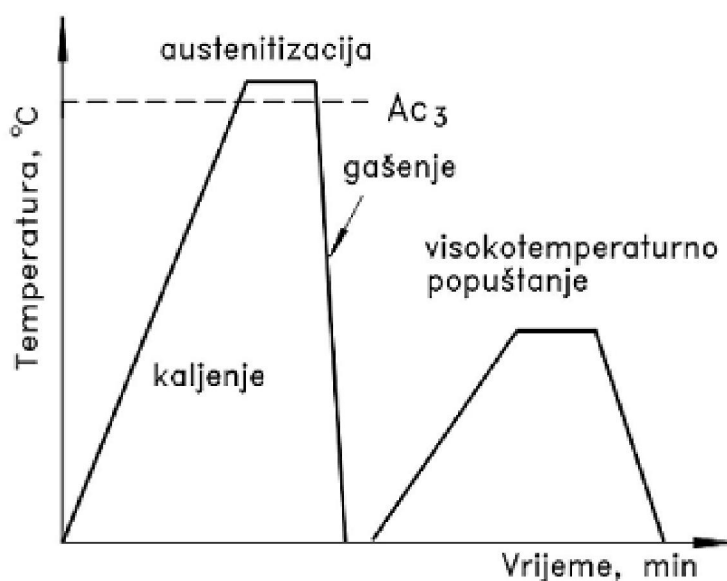
Krom-nikal-molibdenski čelici imaju najveću prokaljivost zbog kompleksnog djelovanja kroma i nikla [21]. Osim toga, nikal neposredno djeluje na povećanje žilavosti. Molibden osigurava postizanje martenzitne i donje bainitne strukture i kod proizvoda velikih dimenzija, pa su ovi čelici primjenjivi za promjere i iznad 250 mm, čak i pri radnim temperaturama od -70 °C.

Čelici za poboljšavanje koji se primjenjuju za izradu topničkih cijevi, podvrgavaju se različitim postupcima za poboljšavanje otpornosti na abrazijsko trošenje. Jedan od tih postupaka je promjena sastava i mikrostrukture materijala koje se postiže poboljšavanjem, nitriranjem i tvrdim kromiranjem. Ovi postupci biti će opisani u sljedećim poglavljima.

6.2.1. Poboljšavanje

6.2.1.1. Klasično poboljšavanje

Poboljšavanje čelika je postupak toplinske obrade koji se sastoji od kaljenja, visokotemperaturnog popuštanja (temperatura popuštanja iznad 400 °C) s glavnom svrhom postizanja visoke granice tečenja i visoke žilavosti. Ovim se postupkom toplinski obrađuju ugljični odnosno niskolegirani čelici za poboljšavanje s 0,3 do 0,6 % C. Poboljšavaju se samo podeutektoidni čelici [22]. Na slici 6.3. prikazan je dijagram postupka klasičnog poboljšavanja čelika.

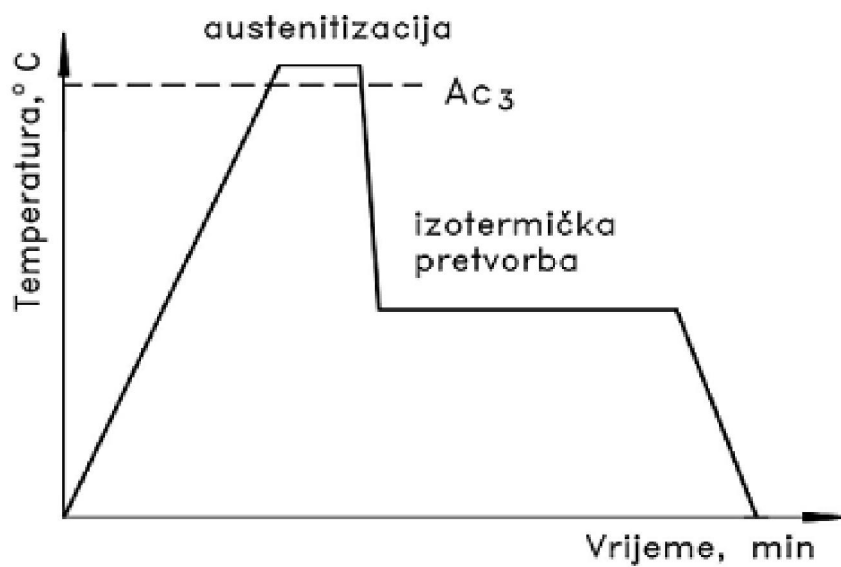


Slika 6.3. Dijagram postupka klasičnog poboljšavanja čelika [23]

6.2.1.2. Izotermičko poboljšavanje

Kod izotermičkog poboljšavanja postupak se odvija kontinuirano. S temperature austenitizacije predmet se ohlađuje na temperaturu izotermičke pretvorbe, drži se određeno vrijeme pri toj temperaturi te potom ohlađuje na sobnu temperaturu. Kod izotermičkog poboljšavanja nema kaljenja i popuštanja komada, već se izravno nakon austenitiziranja na temperaturi austenitizacije, austenitna struktura ohlađivanjem pretvara u bainit. Predmet

nakon austenitiziranja biva prebačen u solnu kupku koja je ugrijana na određenu temperaturu (temperaturu izotermičke pretvorbe). U kupki se predmet zadržava toliko dugo dok se sav pothlađeni austenit ne transformira u bainit. Tek nakon toga se predmet ohlađuje do sobne temperature [24]. Slika 6.4. prikazuje dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja čelika.



Slika 6.4. Dijagram postupka izotermičkog poboljšavanja čelika [23]

Osnovna karakteristika izotermičkog poboljšavanja je smanjenje napetosti i opasnosti od nastajanja mikropukotina. Prednost izotermičkog poboljšavanja u odnosu na klasično je dobivanje viših vrijednosti mehaničkih svojstava (žilavosti, istezljivosti, kontrakcije i dinamičke izdržljivosti) [24].

6.2.2. Nitriranje

Nitriranje (ili nitrokarburiranje) je definirano kao obogaćivanje površinskog sloja obratka dušikom toplinsko-kemijskom obradom modificiranja površine. Toplinsko-kemijska obrada provodi se podvrgavanjem obratka od željeznih materijala, čelika, ili željeznog lijeva, temperaturama koje su obično između 500 °C i 600 °C, u sredstvu koje otpušta dušik [25].

Površina dobivena nitriranjem sastoji se od zone spojeva i difuzijske zone. Zona spojeva nalazi se na vanjskom površinskom području, u kojemu se nalaze spojevi koji sadrže dušik (nitridi) u tako velikoj količini da se strukturom razlikuju od ostaloga područja. U zoni spojeva prisutne su i pore, čija količina i raspored ovise o materijalu i vrsti postupka. Ispod zone spojeva nalazi se sloj koji se naziva zona difuzije.

Za difuzijski sloj legiranih čelika karakteristično je izlučivanje legiranih elemenata. To dovodi do značajnog povišenja tvrdoće u odnosu na poboljšani osnovni materijal, a time se dobiva oslonac zoni spojeva i nastaju tlačna naprezanja. Prije svega, kod legiranih čelika pri nitriranju sa zonom spojeva dolazi do izlučivanja cementita na granicama zrna paralelno sa gornjom površinom.

Tvrda zona spojeva daje posebno dobru otpornost na abrazijsko trošenje i na brazdanje površine. Povišeni sadržaj dušika smanjuje sposobnost površinskog sloja da kemijski reagira u kontaktu sa drugim materijalom ili agresivnim medijima. Tu najveću ulogu ima zona spojeva koja površinski sloj djelotvorno štiti od tribokemijskih reakcija.

Nitriranjem se povećava tvrdoća površinskog sloja, vlačna čvrstoća i granica razvlačenja, te dinamička izdržljivost obratka. Otpornost na koroziju povećava se kod nelegiranih i niskolegiranih čelika, ali se smanjuje kod nehrđajućih. Zona spojeva vrlo je krhka i doprinosi smanjenju žilavosti [25].

Postoji niz postupaka nitriranja (nitrokarburiranja) u plinovima, solnim kupkama i ioniziranim plinovima. Svaki od navedenih postupaka daje konkretna svojstva i strukturu rubnog sloja. Najčešće se osim dušika u površinski sloj dovode i drugi nemetalni elementi (ugljik, kisik, sumpor).

6.2.2.1. Plinsko nitriranje

Plinsko nitriranje se provodi u plinu koji sadrži dušik, najčešće u amonijaku, na temperaturama između 495 i 560 °C. Amonijak (NH₃) disocira u peći (uz čelične predmete kao katalizatore) prema jednadžbi:



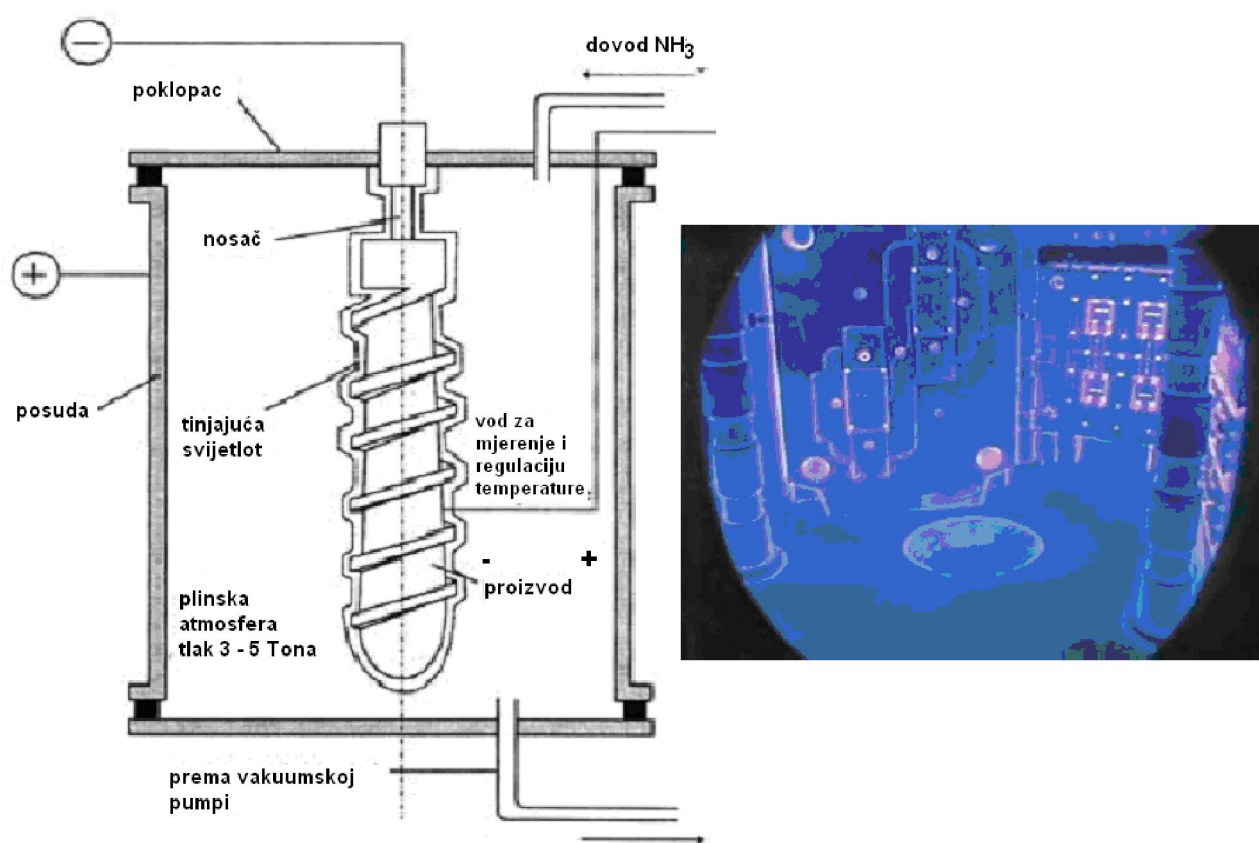
Slobodan dušik difundira u površinske slojeve čeličnih predmeta, u peć treba stalno dovoditi novi NH₃ jer su neiskorišteni atomi N prešli u molekularno stanje N₂. Dovođenje se kontrolira stupnjem disocijacije amonijaka, o čemu izravno ovisi apsorbirana količina dušika i kvaliteta nitriranog sloja. Za plinsko su nitriranje prikladni samo čelici za nitriranje [26].

Prije postupka nitiranja čelici moraju biti kaljeni i popušteni, a temperatura popuštanja mora biti barem 30 °C viša od temperature nitiranja, kako bi se osigurala strukturalna stabilnost tokom nitiranja. Plinsko nitriranje može biti jednostruko ili dvostruko. Kod jednostrukog postupka temperatura nitiranja iznosi između 495 i 525 °C. Ovim postupkom nastaje tvrdi, ali krhki dušikom obogaćen sloj, poznat i kao bijeli sloj.

Dvostruki postupak ima prednost u smislu smanjenja debljine bijelog nitridnog sloja. Prva faza je, osim u duljini trajanja, replika jednokratnog postupka, a zatim slijedi druga faza postupka na temperaturama od 550 do 560 °C. Više temperature tijekom druge faze osiguravaju smanjenje tvrdoće sloja, ali i postizanje veće dubine sloja. Dvostruko nitriranje primjenjuje se za predmete koji se kasnije mogu brusiti i lepati [26, 27].

6.2.2.2. Nitiranje u plazmi

Plazma nitiranje ili ionitiranje je postupak površinske obradbe materijala u plinu koji se pod utjecajem topline razlaže na ione i elektrone. Vrijeme nitiranja kod ionskog nitiranja je kraće nego kod uobičajenih postupaka, a postižu se i više površinske tvrdoće. Maksimalne se tvrdoće postižu kod nižih temperatura kao posljedica visoke koncentracije dušika u plazmi i veće brzine difuzije u površinskom sloju zbog djelovanja ionskog bombardiranja. Slika 6.5. prikazuje nitiranje u plazmi.



Slika 6.5. Postupak nitiranja u plazmi [28]

6.2.2.3. Nitriranje u solnoj kupci

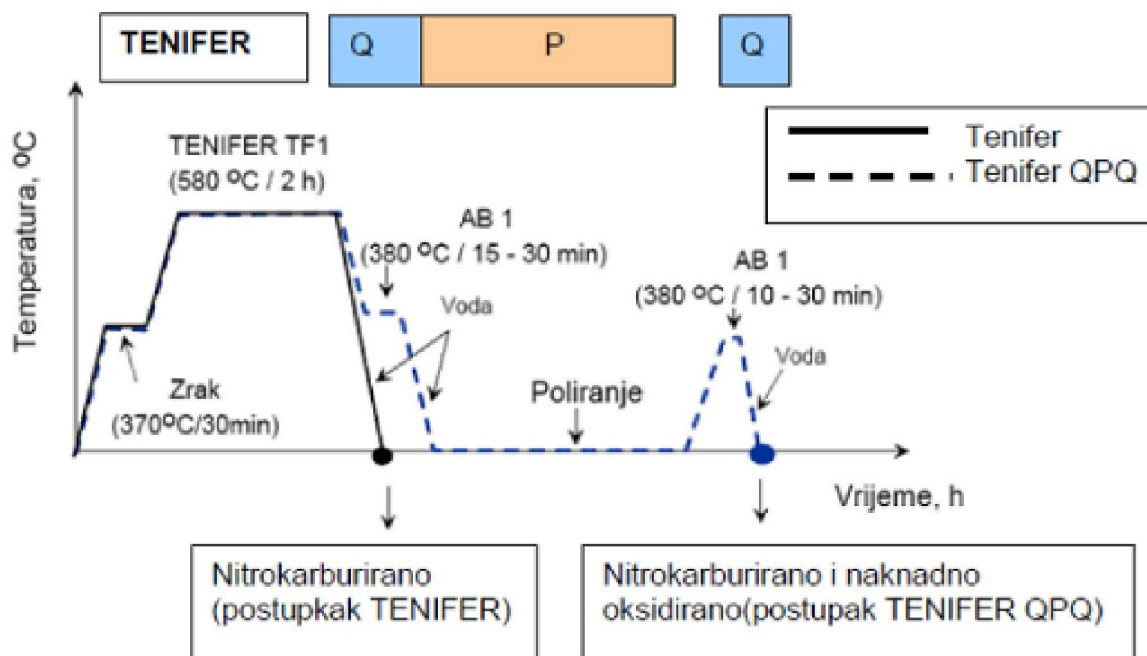
Postupak nitiranja u solnoj kupci se ponekad naziva i postupak cijanizacije, jer se odvija u smjesi cijanidno-cijanatnih soli pri temperaturi 570 - 580 °C u trajanju od 2 do 4 sata (osim kod brzoreznih čelika čija obrada traje 10 - 20 minuta). Odvijanje postupka se sastoji od taljenja krutih suhih soli, starenja solne kupke (zadržavanje na 565 - 595 °C najmanje 12 sati) i uranjanja predmeta predgrijanih na 400 - 450 °C u zagrijanu kupku. Produkti starenja kupke smanjuju sadržaj cijanida, a povećavaju sadržaj cijanata, te nastaje i mala količina karbonata (Na_2CO_3). Kada se starenjem postigne 5% NaCNO , kupka se može nesmetano koristiti.

Minimalni sadržaj NaCN za obradu brzoreznog čelika je 15%, a za obradu alatnih čelika za rad u toplom stanju je 20%. Nitriranje u solnoj kupci se koristi za obradu proizvoda iz ugljičnih i niskolegiranih čelika, brzoreznih čelika, alatnih čelika za rad u toplom stanju, nehrđajućih čelika i lijevanog željeza. Nitiranjem u solnoj kupci ne postižu se visoke tvrdoće kao u slučaju nitiranja u amonijaku, pa se ovaj postupak još naziva „meko nitriranje“.

Nitiranje (odnosno nitrokarburiranje) u solnoj kupci, poznatiji kao TENIFER® postupak, jedan je od najjednostavnijih i najraširenijih postupaka toplinsko-kemijske obrade. Postupak je poznat i pod nazivom TUFFTRIDE®, a u Americi je poznat pod nazivom MELONITE® [29].

Osim samog postupka nitiranja TENIFER, postoje varijante: TENIFER Q, TENIFER QP, TENIFER QPQ. Slova u nazivu Q potječu od engleskih riječi „quenching“ (gašenje), P – polishing (poliranje) i odnose se na naknadnu obradu. Tako postupak TENIFER QPQ označuje da je na nekom obratku bilo provedeno nitriranje i naknadna oksidacija. Solna kupka u kojoj se izvodi nitriranje sastoji se od soli TF1, dok u kupci u kojoj se vrši hlađenje i naknadna oksidacija je sol AB1.

Postupak nitiranja se sastoji od nekoliko faza (sl. 6.6.). Prva faza je predgrijavanje na zraku pri temperaturi 350 – 400 °C u vremenu trajanja od 30 minuta. Zatim slijedi nitriranje u solnoj kupci TF1 pri temperaturi 580 °C u vremenu trajanja od dva sata i zatim ohlađivanje obratka u oksidativnoj kupki AB1 pri temperaturi 380 °C. Kupka AB1 osim što hladi obradak, ima i niz drugih prednosti kao što su oksidacijsko djelovanje pri čemu nastaje crni željezni oksidni sloj (magnetit) s pozitivnim utjecajem na dimenzijsku stabilnost (mala mogućnost da dođe do pucanja).



Slika 6.6. Dijagram postupka TENIFER i TENIFER QPQ [30]

Vrijeme trajanja hlađenja ovisi o dimenzijama obratka te uglavnom iznosi 15 – 30 minuta (kako bi se izjednačila temperatura površine i jezgre). Nakon što se obradak ohladi na sobnu temperaturu (u vodi ili na zraku) ispire se u toploj vodi kako bi se uklonili eventualni ostaci soli. Ako se postupak provodi samo do ovog stadija, naziva se TENIFER Q proces, a nastali sloj se sastoji od zone spojeva, difuzijske zone i od oksidnog sloja Fe_3O_4 . U trećoj fazi slijedi poliranje obratka koje se izvodi upotrebom finog brusnog papira kojim se skida 2 – 3 μm površinskog poroznog sloja. Prilikom poliranja treba paziti da se ne odstrani previše kako se ne bi narušila postojanost zone spojeva. Tako pripremljen obradak ima manju hrapavost površine i niži koeficijent trenja. Ovaj stadij se zove TENIFER QP proces [31].

Nakon poliranja slijedi treća faza kada se obradak ponovno uranja u oksidativnu kupku AB1 na temperaturi 380 °C u trajanju od 10 – 30 minuta s ciljem povišenja korozijske postojanosti [17]. Na kraju postupka obratci imaju lijepu tamno plavu boju. Ovaj stadij se zove TENIFER QPQ ili MELONIT QPQ. Postupak završnog uranjanja u oksidativnu kupku AB1 moguće je ponoviti više puta čime se postiže dodatno povećanje korozijske postojanosti [31].

6.2.3. *Tvrdo kromiranje*

Tvrdo kromiranje je galvanski postupak nanošenja kroma na metalnu površinu. Izvodi se u elektrolitu čiji su glavni sastojci kromtrioksid CrO_3 i sumporna kiselina H_2SO_4 . Normirani elektrolit sadrži 250 g/l kromtrioksida CrO_3 i 2,5 g/l sumporne kiseline H_2SO_4 [12]. Debljina tvrde kromne prevlake može biti od 0,001 do 0,5 mm, a ovisi o temperaturi kupke, gustoći struje i trajanju kromiranja. Pri temperaturi elektrolita od 55 °C preporuča se gustoća struje od 35 A/dm² [11].

Anode za kromiranje izrađene su od olova ili olovnih legura, jer se na takvim anodama lako odvija oksidacija trovalentnog kroma. Pri taloženju metalnog kroma, na katodi (radnom predmetu) istodobno se izdvaja vodik. Difuzijom vodika u čelik, taj čelik postaje krhak. da bi se izbjegla pojava krhkosti čelika zbog nazočnosti vodika, radne predmete treba radi eliminiranja vodika, nakon kromiranja zagrijati na temperaturu od 150 do 260 °C u trajanju od 1 do 5 sati [12].

Radi postizanja jednolikosti prevlake, izložena mjesta dijelova na kojima se očekuje veće taloženje kroma treba djelomično zaštititi limovima ili pomoćnim katodama. Na nepovoljno položenim područjima, kao primjerice u provrtima, na kojim se očekuje slabo taloženje, treba radi poboljšanja taloženja staviti pomoćnu anodu, a pred izbočine treba staviti zaslone koji mogu biti nevodljivi (obično od polimera) ili vodljivi (od katodno spojenog metala) [25].

Tvrđi krom, poznat kao industrijski krom, koji je nanesen na površinu predmeta ima vrlo visoku tvrdoću, između 66 - 70 HRC. Debljina tvrdo kromiranog sloja obično se kreće u rasponu od 0,075 do 0,25 mm [32].

Prilikom tvrdog kromiranja cijevi, prevlaka kroma nanosi se samo na površinu kanala cijevi. Za postizanje jednoličnog sloja, anodu treba točno centrirati u os kanala cijevi i treba osigurati strujanje elektrolita unutar cijevi [11].

Danas se primjenjuje postupak provlačenja pribora za kromiranje uzduž kanala cijevi, pri čemu je brzina provlačenja upravo tolika da se na površinu kanala cijevi stigne nataložiti sloj kroma potrebne debljine [11].

7. EKSPERIMENTALNI DIO

7.1. Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanih, nitriranih i tvrdo kromiranih uzoraka odabranih čelika za topničke cijevi

Ispitivanje otpornosti na abrazijsko trošenje čeličnih uzoraka provedeno je metodom "suhi pijesak - gumeni kotač". Ispitivanje je opisano u poglavlju 6. Ispitni uzorci su izrađeni od tri vrste čelika za poboljšavanje i svaki je od njih podvrgnut različitim toplinskim obradama. Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za tribologiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu.

Ispitni uzorci su:

- EN C45 (Č1530);
- EN 25CrMo4 (Č4730);
- EN 36CrNiMo4 (Č5430).

Toplinske obrade koju su provedene:

- Poboljšavanje;
- Nitriranje;
- Tvrdo kromiranje.

Parametri ispitivanja:

- Rotirajući kotač obložen gumom tvrdoće od 50 HSA;
- Pijesak OTTAWA AFS 50/70;
- Protok pijeska: 300 g/min;
- Brzina vrtnje kotača: 200 o/min;
- Na mjestu dodira kotača s epruvetom kotač se okreće u smjeru istjecanja pijeska;
- Opterećenje silom: $F = 130 \text{ N}$ prema normi ASTM G65-94;
- Mjerenje gubitaka mase nakon: 100, 500 i 1000 okretaja.

7.2. Rezultati ispitivanja

7.2.1. Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN C45

U tablicama 7.1., 7.2. i 7.3. prikazane su vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje čelika EN C45.

Tablica 7.1. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranog čelika EN C45

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	157,7465	157,7258	157,6526	157,5715
2.	157,5715	157,5526	157,4809	157,4071
3.	157,4071	157,3849	157,3188	157,2413
4.	157,2413	157,2219	157,1531	157,0749

Tablica 7.2. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdo kromiranog čelik EN C45

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	162,0946	162,0808	162,0157	161,9394
2.	161,9394	161,9259	161,8639	161,7893
3.	161,7893	161,7708	161,7076	161,6346
4.	161,6346	161,6202	161,5544	161,4816

Tablica 7.3. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanog čelika EN C45

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	161,7221	161,7032	161,6344	161,5596
2.	161,5596	161,5434	161,4801	161,4132
3.	161,4132	161,3923	161,3302	161,2588
4.	161,2588	161,2421	161,1784	161,1116

7.2.2. Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 25CrMo4

U tablicama 7.4., 7.5. i 7.6. prikazane su vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje čelika EN 25CrMo4.

Tablica 7.4. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranog čelika EN 25CrMo4

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	156,5469	156,5273	156,4621	156,3893
2.	156,3893	156,3711	156,3066	156,2359
3.	156,2359	156,2189	156,1562	156,0876
4.	156,0876	156,0717	156,0161	155,9497

Tablica 7.5. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdo kromiranog čelika EN 25CrMo4

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	157,9138	157,9019	157,8405	157,7733
2.	157,7733	157,7629	157,7073	157,6433
3.	157,6433	157,6347	157,5826	157,5243
4.	157,5243	157,5146	157,4604	157,4022

Tablica 7.6. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanog čelika EN 25CrMo4

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	158,5319	158,5152	158,4571	158,3938
2.	158,3938	158,3781	158,3239	158,2619
3.	158,2619	158,2484	158,1906	158,1391
4.	158,1391	158,1259	158,0732	158,0174

7.2.3. Rezultati ispitivanja uzoraka od čelika EN 36CrNiMo4

U tablicama 7.7., 7.8. i 7.9. prikazane su vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje čelika EN 36CrNiMo4.

Tablica 7.7. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje nitriranog čelika EN 36CrNiMo4

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	157,1181	157,1019	157,0399	156,9706
2.	156,9706	156,9544	156,9011	156,8314
3.	156,8314	156,8159	156,7569	156,6922
4.	156,6922	156,6791	156,6208	156,5609

Tablica 7.8. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje tvrdo kromiranog čelika EN 36CrNiMo4

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	158,5482	158,5349	158,4811	158,4252
2.	158,4252	158,4122	158,3594	158,3041
3.	158,3041	158,2883	158,2401	158,1819
4.	158,1819	158,1698	158,1224	158,0649

Tablica 7.9. Vrijednosti mase nakon različitog broja okretaja pri ispitivanju otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanog čelika EN 36CrNiMo4

Broj mjerenja	Početna masa [g]	Masa nakon 100 okretaja [g]	Masa nakon 500 okretaja [g]	Masa nakon 1000 okretaja [g]
1.	158,4147	158,4014	158,3491	158,2909
2.	158,2909	158,2771	158,2289	158,1719
3.	158,1719	158,1578	158,1189	158,0505
4.	158,0505	158,0371	157,9869	157,9316

U tablicama 7.10., 7.11. i 7.12. prikazane su srednje vrijednosti gubitka mase pri različitim brojevima okretaja za pojedine skupine čeličnih uzoraka ispitanih na abrazijsko trošenje.

Tablica 7.10. Srednje vrijednosti gubitka mase nitriranih čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 35CrNiMo4

Vrsta čelika	C45			25CrMo4			36CrNiMo4		
	Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]		Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]		Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]	
Gubitak mase nakon 100 okretaja [g]	1.	0,0207	$\bar{x} = 0,0203$	1.	0,0196	$\bar{x} = 0,0177$	1.	0,0162	$\bar{x} = 0,0153$
	2.	0,0189		2.	0,0182		2.	0,0162	
	3.	0,0222		3.	0,0170		3.	0,0155	
	4.	0,0194		4.	0,0159		4.	0,0131	
Gubitak mase nakon 500 okretaja [g]	1.	0,0939	$\bar{x} = 0,0890$	1.	0,0848	$\bar{x} = 0,0797$	1.	0,0782	$\bar{x} = 0,0734$
	2.	0,0906		2.	0,0827		2.	0,0695	
	3.	0,0833		3.	0,0797		3.	0,0745	
	4.	0,0882		4.	0,0715		4.	0,0714	
Gubitak mase nakon 1000 okretaja [g]	1.	0,1750	$\bar{x} = 0,1679$	1.	0,1576	$\bar{x} = 0,1493$	1.	0,1475	$\bar{x} = 0,1393$
	2.	0,1644		2.	0,1534		2.	0,1392	
	3.	0,1658		3.	0,1483		3.	0,1392	
	4.	0,1664		4.	0,1379		4.	0,1313	

Tablica 7.11. Srednje vrijednosti gubitka mase tvrdo kromiranih čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 35CrNiMo4

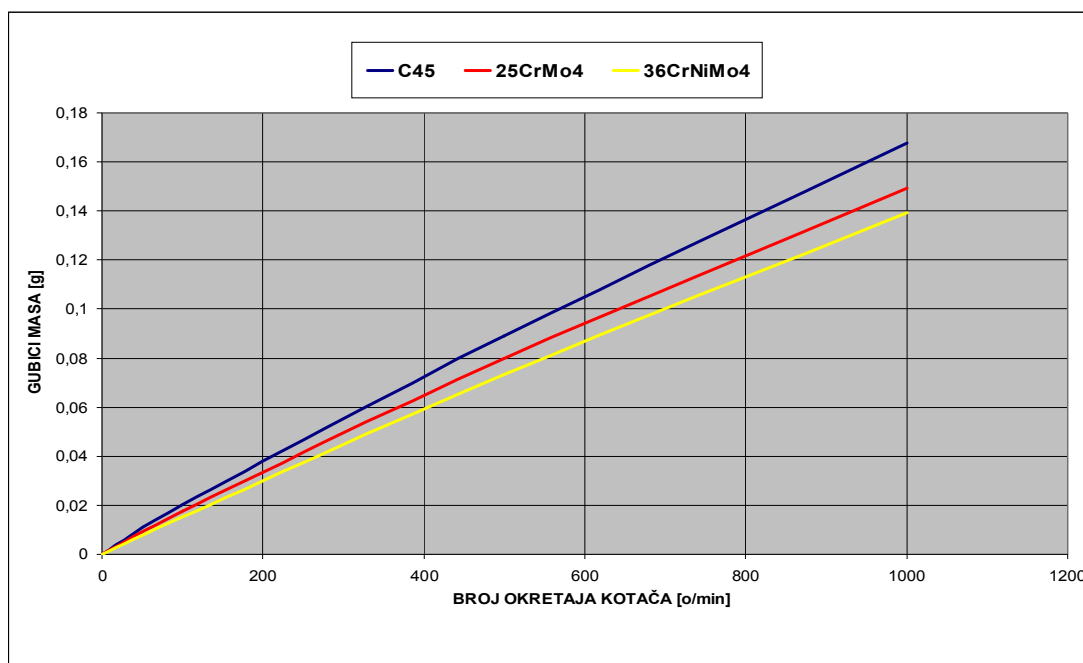
Vrsta čelika	C45			25CrMo4			36CrNiMo4		
	Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]		Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]		Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]	
Gubitak mase nakon 100 okretaja [g]	1.	0,0138	$\bar{x} = 0,0151$	1.	0,0119	$\bar{x} = 0,0102$	1.	0,0133	$\bar{x} = 0,0135$
	2.	0,0135		2.	0,0104		2.	0,0130	
	3.	0,0185		3.	0,0086		3.	0,0158	
	4.	0,0144		4.	0,0097		4.	0,0121	
Gubitak mase nakon 500 okretaja [g]	1.	0,0789	$\bar{x} = 0,0791$	1.	0,0733	$\bar{x} = 0,0659$	1.	0,0671	$\bar{x} = 0,0641$
	2.	0,0755		2.	0,0660		2.	0,0658	
	3.	0,0817		3.	0,0607		3.	0,0640	
	4.	0,0802		4.	0,0639		4.	0,0595	
Gubitak mase nakon 1000 okretaja [g]	1.	0,1552	$\bar{x} = 0,1533$	1.	0,1405	$\bar{x} = 0,1279$	1.	0,1230	$\bar{x} = 0,1208$
	2.	0,1501		2.	0,1300		2.	0,1211	
	3.	0,1547		3.	0,1190		3.	0,1222	
	4.	0,1530		4.	0,1221		4.	0,1170	

Tablica 7.12. Srednje vrijednosti gubitka mase poboljšanih čelika EN C45, EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4

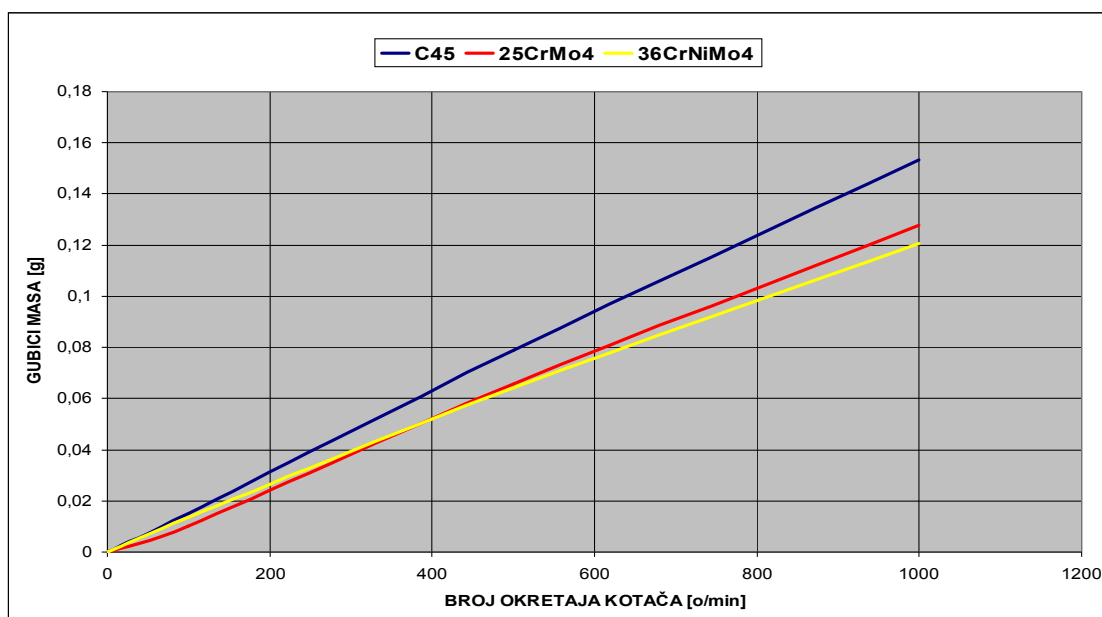
Vrsta čelika	C45			25CrMo4			36CrNiMo4		
	Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]		Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]		Broj mjerenja	Srednja vrijednost [g]	
Gubitak mase nakon 100 okretaja [g]	1.	0,0189	$\bar{x} = 0,0182$	1.	0,0167	$\bar{x} = 0,0147$	1.	0,0133	$\bar{x} = 0,0136$
	2.	0,0162		2.	0,0157		2.	0,0138	
	3.	0,0209		3.	0,0135		3.	0,0141	
	4.	0,0167		4.	0,0132		4.	0,0134	
Gubitak mase nakon 500 okretaja [g]	1.	0,0877	$\bar{x} = 0,0826$	1.	0,0748	$\bar{x} = 0,0705$	1.	0,0656	$\bar{x} = 0,0611$
	2.	0,0795		2.	0,0699		2.	0,0620	
	3.	0,0830		3.	0,0713		3.	0,0530	
	4.	0,0804		4.	0,0659		4.	0,0636	
Gubitak mase nakon 1000 okretaja [g]	1.	0,1625	$\bar{x} = 0,1526$	1.	0,1381	$\bar{x} = 0,1286$	1.	0,1238	$\bar{x} = 0,1207$
	2.	0,1464		2.	0,1319		2.	0,1190	
	3.	0,1544		3.	0,1228		3.	0,1214	
	4.	0,1472		4.	0,1217		4.	0,1189	

7.3. Analiza rezultata dobivena ispitivanjem otpornosti na abrazijsko trošenje poboljšanih, nitriranih i tvrdo kromiranih čeličnih uzoraka EN C45, EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4

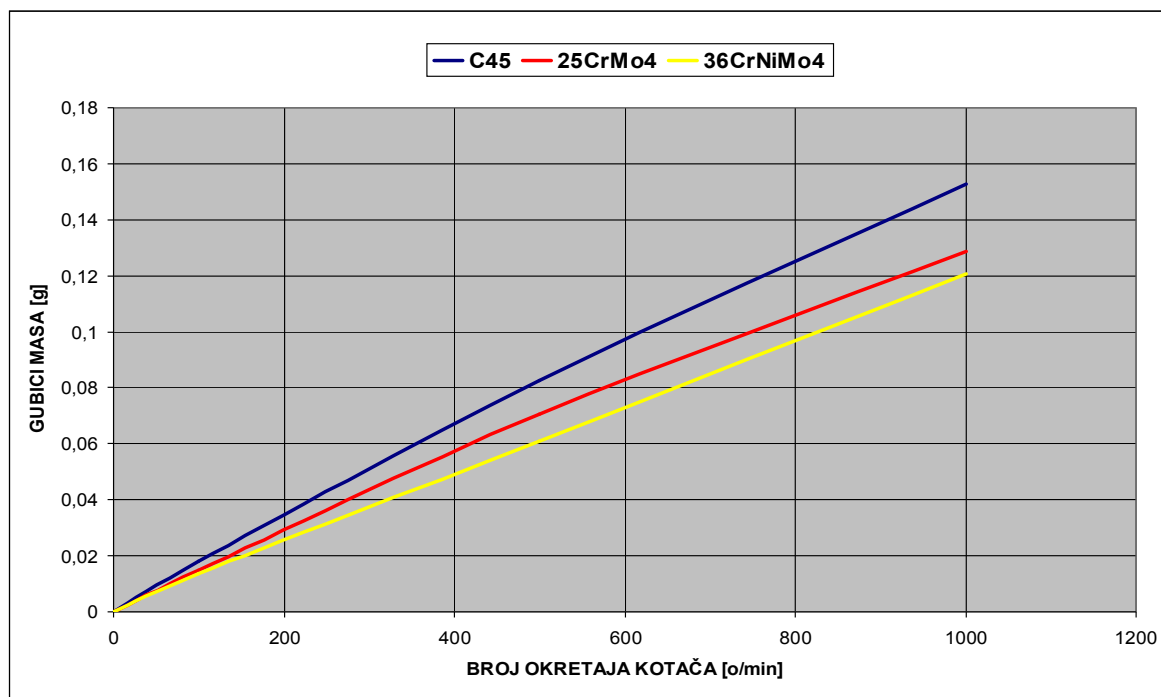
Rezultati dobiveni ispitivanjem otpornosti na abrazijsko trošenje čeličnih uzoraka prikazani su dijagramima na slikama 7.1., 7.2. i 7.3.



Slika 7.1. Gubici mase pri abrazijskom trošenju ovisno o broju okretaja kotača za nitrirane čelične uzorke



Slika 7.2. Gubici mase pri abrazijskom trošenju ovisno o broju okretaja kotača za tvrdo kromirane čelične uzorke



Slika 7.3. Gubici mase pri abrazijskom trošenju ovisno o broju okretaja kotača za poboljšane čelične uzorke

Analizom rezultata ispitivanja otpornosti na abrazijsko trošenje čeličnih uzoraka, vidljivo je da uzorci od čelika EN C45 u nitriranom, tvrdo kromiranom i poboljšanom stanju imaju najlošiju otpornost na abrazijsko trošenje, dok čelici EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4 u tvrdo kromiranom stanju imaju podjednaku otpornost na abrazijsko trošenje. Čelični uzorak EN 36CrNiMo4 u poboljšanom stanju ima najbolju otpornost na abrazijsko trošenje u odnosu na uzorke od čelika EN C45 i EN 25CrMo4 koji su također u poboljšanom stanju.

7.4. Karakterizacija čeličnih uzoraka ispitivanih na abrazijsko trošenje

Za karakterizaciju su odabrana tri čelična uzorka:

- 1. uzorak - EN 25CrMo4 (nitriran);
- 2. uzorak - EN C45 (tvrdo kromiran);
- 3. uzorak - EN 36CrNiMo4 (poboljšan).

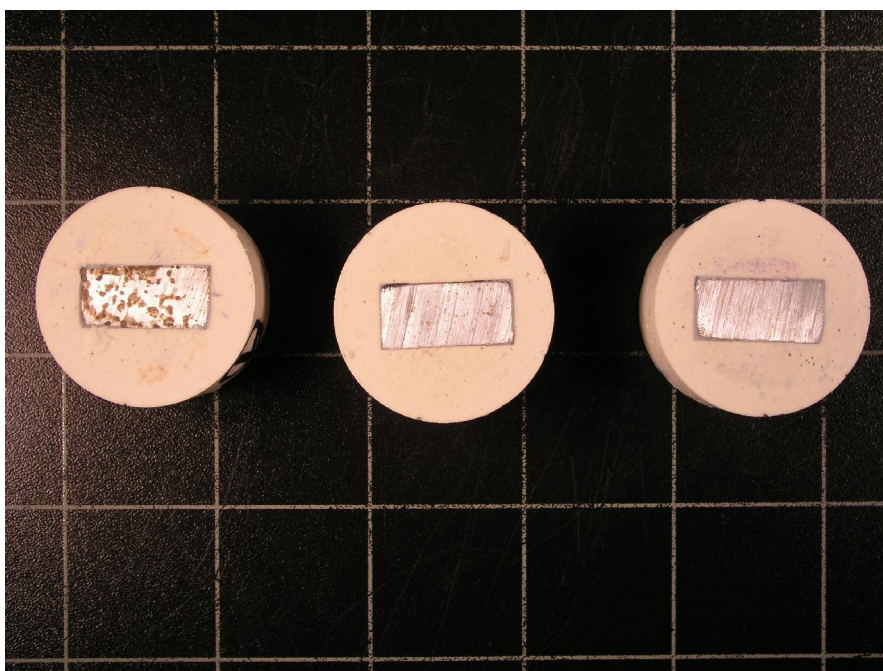
Uzorci se pripremaju tako da se postave u kalupe (sl. 7.4.) koji su označeni brojevima. U kalupe se ulijeva smjesa TRIO FIX - 2, koja se sastoji od tri komponente. Miješanjem tih komponenti nastaje kit koji se stvrdne. Nakon toga uzorci se izvade iz kalupa te se bruse i poliraju na uređaju za brušenje i poliranje oznake STRUERS DAP - V. (sl. 7.5.). Na slici 7.6. prikazani su pripremljeni uzorci za brušenje i poliranje.



Slika 7.4. Kalup za uzorke



Slika 7.5. Uređaj za brušenje i poliranje - STRUERS DAP - V



Slika 7.6. Pripremljeni uzorci za brušenje i poliranje

7.4.1. Brušenje

Za brušenje uzoraka koristi se brusni papir koji na sebi sadrži čestice silicijevog karbida (SiC). Veličina zrna je 63 μm . Sredstvo za hlađenje je voda. Brzina vrtnje podloge je 300 o/min, a sila F kojom je uzorak pritisnut o podlogu iznosi 200 N. Uzorci se bruse sve dok površina uzorka ne postane dovoljno dobro pripremljena za sljedeći postupak. Na slici 7.7. prikazano je brušenje uzoraka.



Slika 7.7. Brušenje uzoraka

7.4.2. Poliranje

Poliranje uzoraka provodi se 4 puta gdje se koriste 4 vrste podloga:

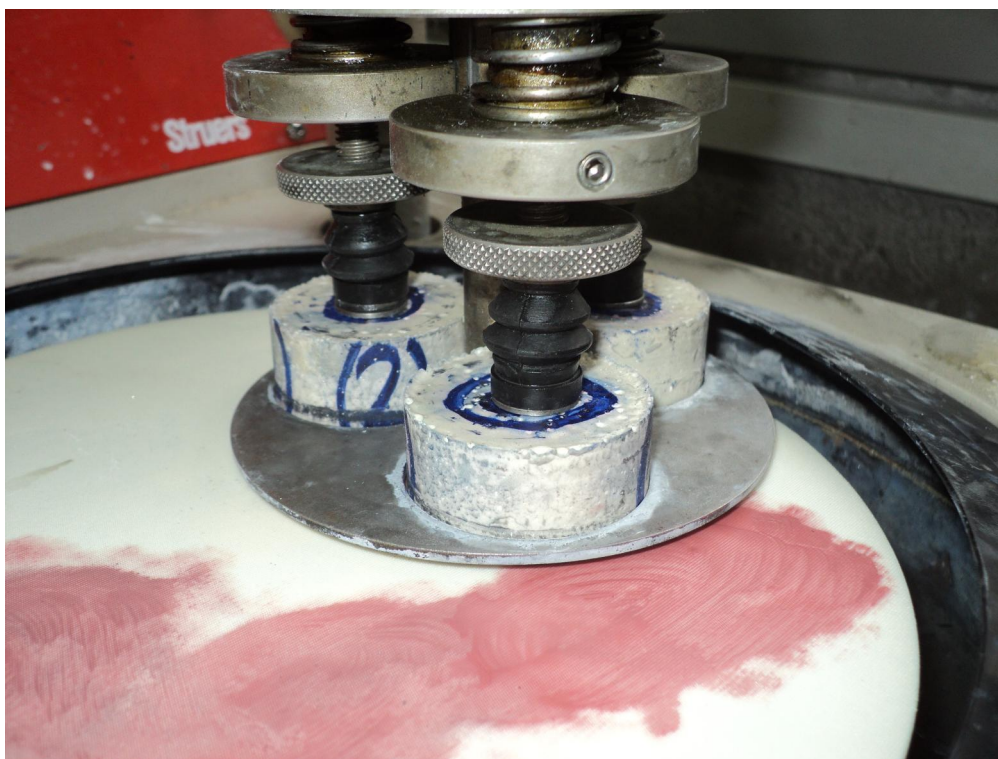
- 1. podloga - DP Plan;
- 2. podloga - DP Pan;
- 3. podloga - DP Mol;
- 4. podloga - OP Chem.

Pri prvom poliranju koristi se 1. podloga DP Plan na koju se nanosi pasta sa dijamantnim česticama veličine 9 μm . Za hlađenje i podmazivanje koristi se sredstvo DP LUBRICANTE BLUE. Brzina vrtnje podloge je 150 o/min. Sila kojom su uzorci pritisnuti o podlogu iznosi 200 N, a postupak poliranja traje 5 minuta.

Kod drugog poliranja koristi se 2. podloga DP Pan na koju se nanosi pasta s dijamantnim česticama veličine 6 μm . Za hlađenje i podmazivanje koristi se sredstvo kao pri poliranju sa 1. podlogom. Brzina vrtnje, sila kojom su uzorci pritisnuti o podlogu i trajanje poliranja iznosi isto kao pri poliranju s 1. podlogom.

Kod trećeg poliranja koristi se 3. podloga DP Mol na koju se nanosi tekućina s dijamantnim česticama veličine 3 μm . Za podmazivanje i hlađenje koristi se tekućina DIALUB SW. Brzina vrtnje podloge i sila kojom su uzorci pritisnuti o podlogu su isti kao i pri prvom i drugom poliranju. Vrijeme poliranja iznosi 4 minute.

Kod četvrtog poliranja, odnosno kod zadnjeg poliranja, koristi se 4. podloga OP Chem na koju se nanosi OP - U suspenzija. Brzina vrtnje podloge je 150 o/min. Sila kojom su uzorci pritisnuti o podlogu iznosi 50 N, a vrijeme trajanja poliranja iznosi 1 minutu. Slika 7.8. prikazuje postupak poliranja uzoraka.

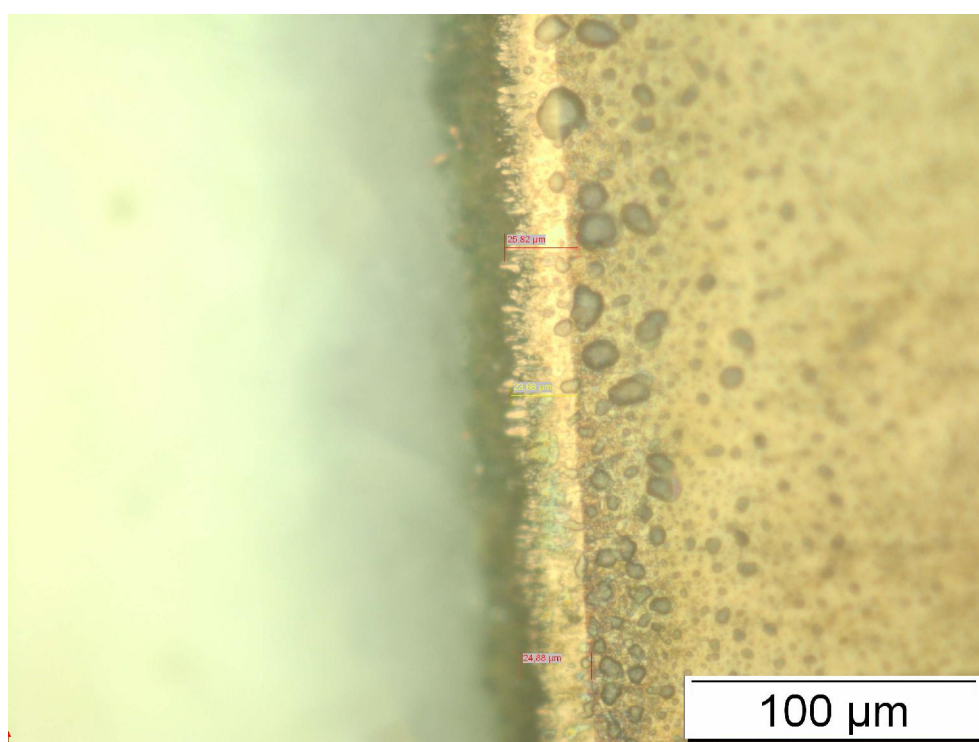


Slika 7.8. Poliranje uzoraka

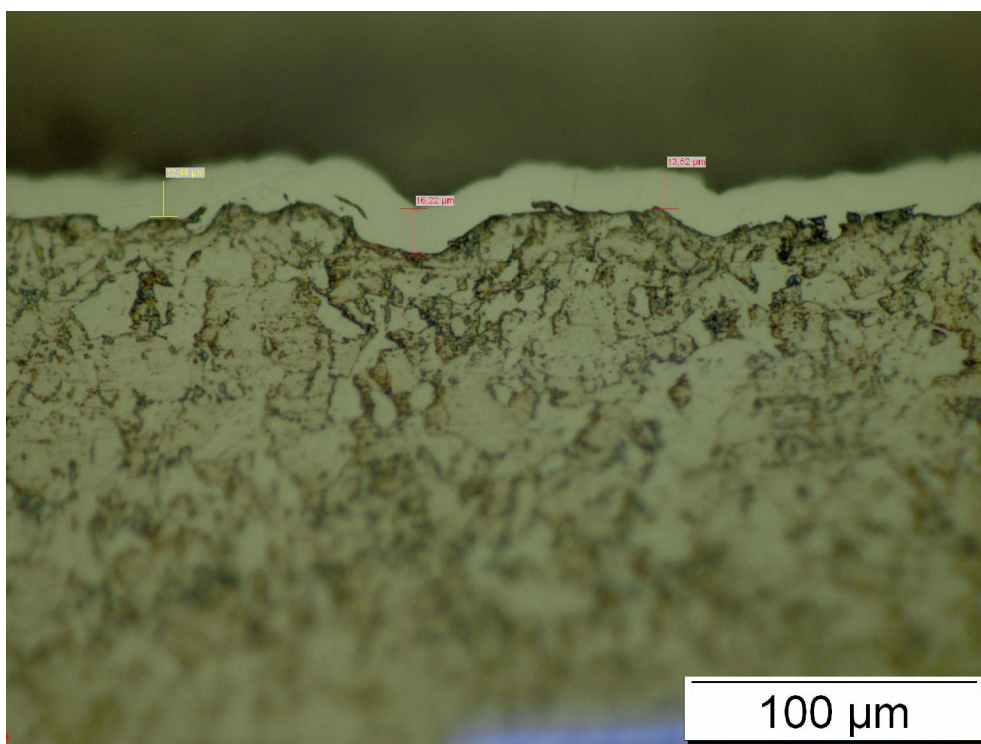
Nakon poliranja uzorci su pripremljeni za metalografsko snimanje i snimani su u Laboratoriju za materijalografiju Fakulteta strojarstva i brodogradnje u Zagrebu.

Uzorak EN C45 koji je u tvrdo kromiranom stanju, nagrizen je NITAL-om, a uzorci EN 25CrMo4 u nitriranom i EN 36CrNiMo4 u poboljšanom stanju nagrizeni, su otopinom KALLING'S.

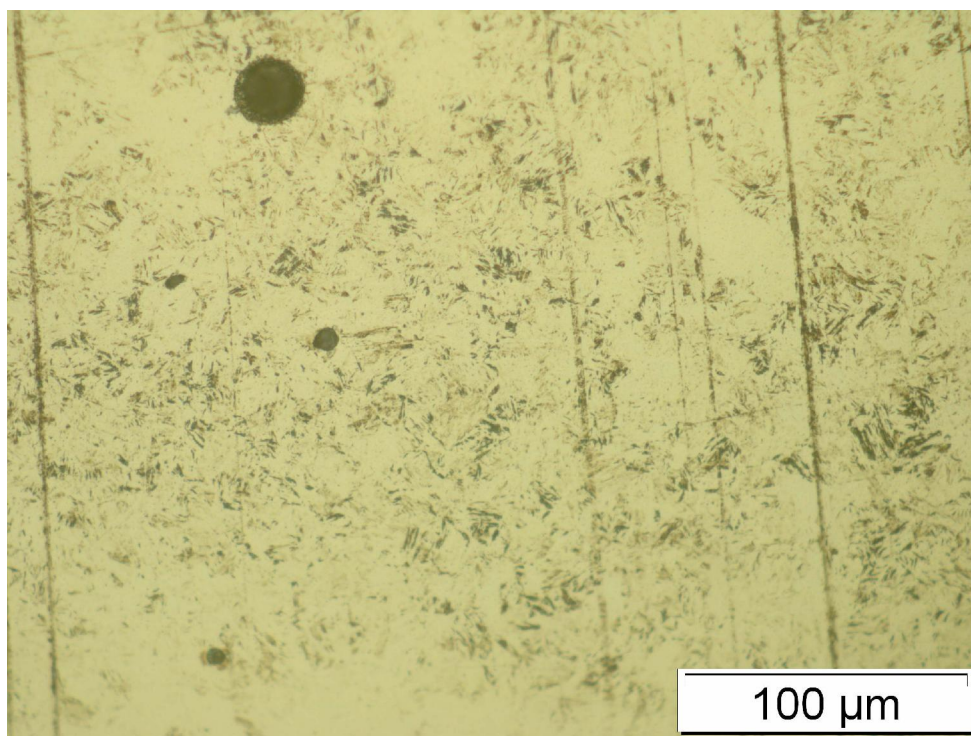
Metalografske snimke poprečnog presjeka čeličnih uzoraka za pojedina stanja površine prikazane su na slikama 7.9, 7.10. i 7.11.



Slika 7.9. Metalografska snimka presjeka površinskog sloja nitriranog uzorka od čelika EN 25CrMo4



Slika 7.10. Metalografska snimka presjeka površinskog sloja tvrdo kromiranog uzorka od čelika EN C45



Slika 7.11. Metalografska snimka presjeka površinskog sloja poboljšanog uzorka od čelika EN 36CrNiMo4

7.5. Mjerenje tvrdoće

Na metalografski pripremljenim uzorcima mjeri se tvrdoća po poprečnom presjeku, od ruba prema jezgri i na samoj jezgri uzorka. Mjerenje tvrdoće izvodi se pomoću mikrotvrdomjera prema Vickers metodi, s opterećenjem HV 0,2. Mjerenje tvrdoće od ruba prema jezgri provedeno je u 3 serije po 5 mjerenja, na dubini od 0,2 mm, a mjerenje po jezgri uzorka provedeno je 6 puta na različitim dubinama.

7.5.1. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku od čelika EN C45

U tablicama 7.13, 7.14. i 7.15. prikazane su vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika EN C45.

Tablica 7.13. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45, 1. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	43,5	196
2.	0,4	44,7	186
3.	0,6	42,3	207
4.	0,8	40,7	224
5.	1	43,8	193

Tablica 7.14. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45, 2. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	37,2	268
2.	0,4	42,3	207
3.	0,6	37,7	261
4.	0,8	35,6	293
5.	1	33,8	325

Tabela 7.15. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45, 3. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	54,6	124
2.	0,4	42,3	207
3.	0,6	42,8	202
4.	0,8	52,3	136
5.	1	48,1	161

7.5.2. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku od čelika EN 25CrMo4

U tablicama 7.16, 7.17. i 7.18. prikazane su vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika EN 25CrMo4.

Tablica 7.16. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4, 1. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	30,8	391
2.	0,4	41,4	216
3.	0,6	56,7	115
4.	0,8	42,3	207
5.	1	44,1	191

Tablica 7.17. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4, 2. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	42,3	207
2.	0,4	41,9	211
3.	0,6	54,4	125
4.	0,8	55,3	121
5.	1	56,2	117

Tablica 7.18. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4, 3. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	32,1	360
2.	0,4	40,2	229
3.	0,6	45,9	176
4.	0,8	45,3	181
5.	1	45,9	176

7.5.3. Rezultati mjerenja tvrdoće na uzorku od čelika EN 36CrNiMo4

U tablicama 7.19, 7.20. i 7.21. prikazane su vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika EN 36CrNiMo4.

Tablica 7.19. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4, 1. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	50,4	146
2.	0,4	47,1	167
3.	0,6	44,1	191
4.	0,8	43,5	196
5.	1	37,7	261

Tablica 7.20. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4, 2. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	46,8	169
2.	0,4	37,7	261
3.	0,6	44,1	191
4.	0,8	38,9	245
5.	1	41,1	220

Tablica 7.21. Vrijednosti tvrdoće od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4, 3. serija mjerenja

Broj mjerenja	Dubina mjerenja [mm]	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	0,2	39,8	234
2.	0,4	38,1	255
3.	0,6	38,6	249
4.	0,8	36,8	274
5.	1	41,7	213

U tablicama 7.22, 7.23. i 7.24. prikazane su vrijednosti tvrdoće jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika EN C45, nitrirane uzorke od čelika EN 25CrMo4 i poboljšane uzorke od čelika EN 36CrNiMo4.

Tablica 7.22. Vrijednosti tvrdoće jezgre za tvrdo kromirane uzorke od čelika C45

Broj mjerenja	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	47,1	167
2.	42,8	202
3.	43,8	193
4.	42,3	207
5.	41,1	220
6.	37,2	268
Srednja vrijednost tvrdoće \bar{x}		209,5

Tablica 7.23. Vrijednosti tvrdoće jezgre za nitrirane uzorke od čelika 25CrMo4

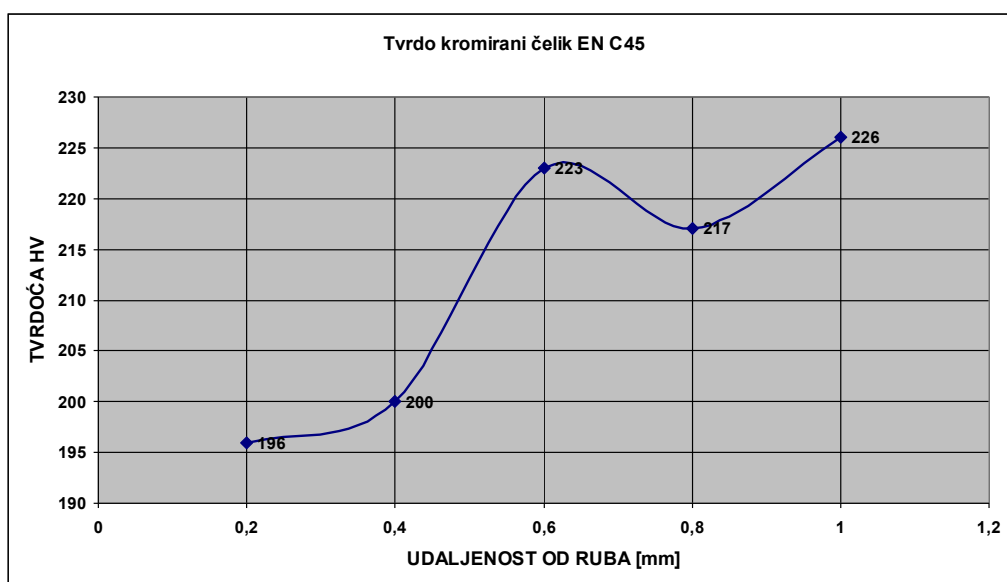
Broj mjerenja	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	44,7	186
2.	44,7	186
3.	45	183
4.	43,8	193
5.	36,3	281
6.	40,7	224
Srednja vrijednost tvrdoće \bar{x}		208

Tablica 7.24. Vrijednosti tvrdoće jezgre za poboljšane uzorke od čelika 36CrNiMo4

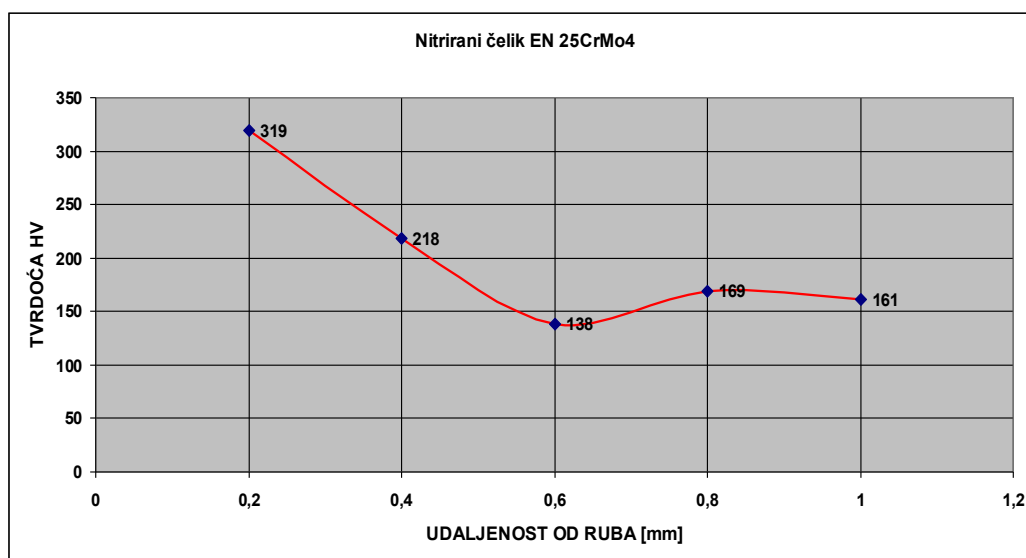
Broj mjerenja	Duljina dijagonale [μm]	Tvrdoća HV 0,2
1.	55,8	119
2.	61,3	99
3.	48,1	160
4.	49,5	151
5.	45,6	178
6.	42,3	207
Srednja vrijednost tvrdoće \bar{x}		152,3

7.6. Analiza rezultata dobivena mjerenjem tvrdoće tvrdo kromiranih uzoraka od čelika EN C45, nitriranih uzoraka od čelika EN 25CrMo4 i poboljšanih uzoraka od čelika EN 36CrNiMo4.

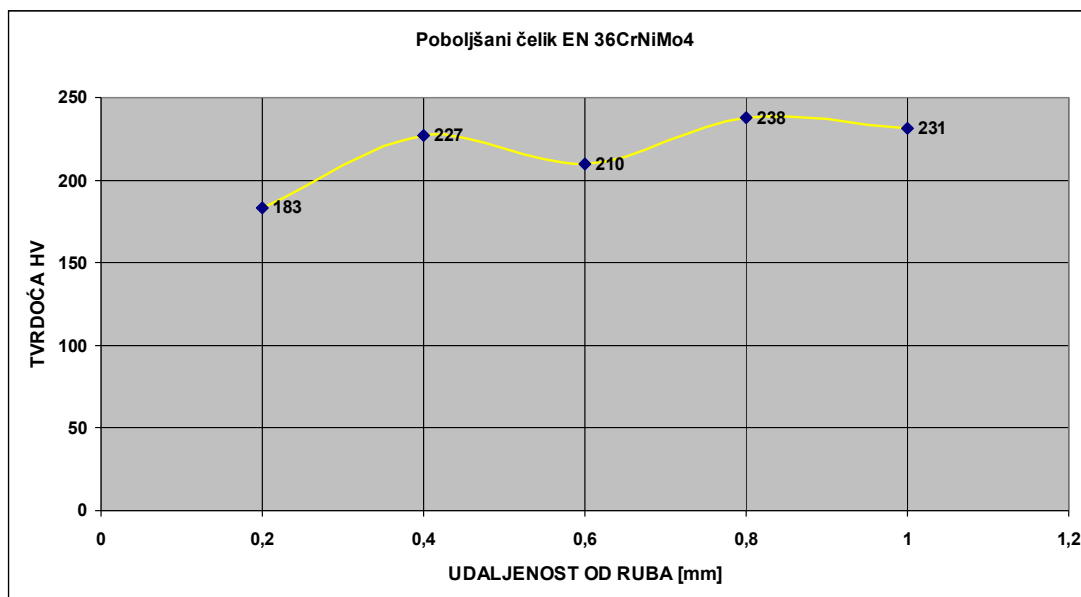
Raspodjela tvrdoća po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika EN C45, nitrirane uzorke od čelika EN 25CrMo4 i poboljšane uzorke od čelika EN 36CrNiMo4, prikazane su grafički na slikama 7.12, 7.13. i 7.14, a na slici 7.15. grafički su prikazane srednje vrijednosti tvrdoća po jezgri uzoraka.



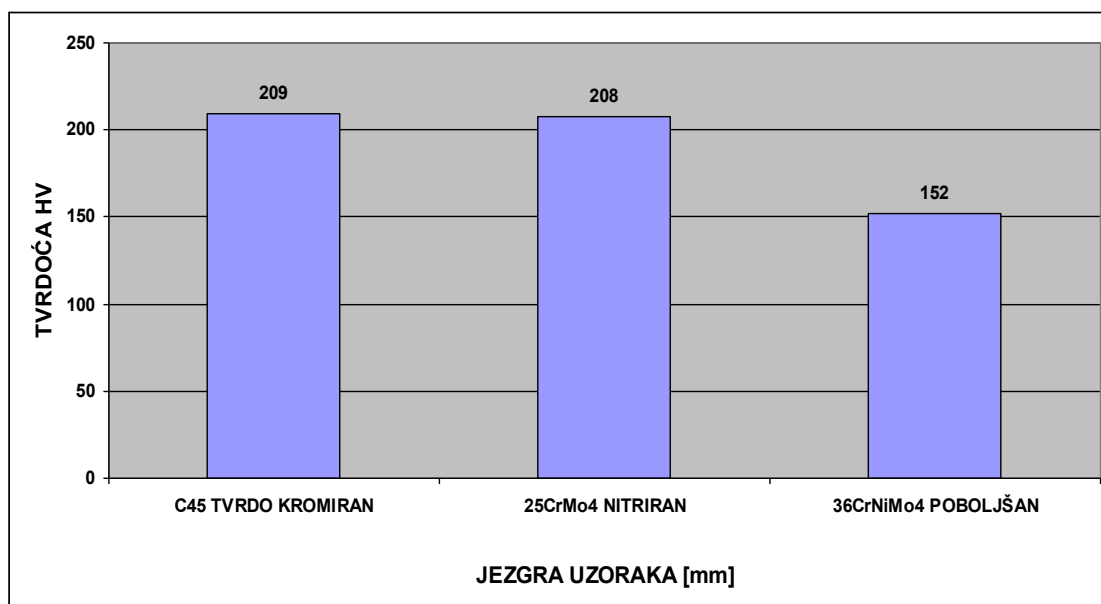
Slika 7.12. Raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za tvrdo kromirane uzorke od čelika EN C45



Slika 7.13. Raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za nitrirane uzorke od čelika EN 25CrMo4



Slika 7.14. Raspodjela tvrdoće po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri za poboljšane uzorke od čelika EN 36CrNiMo4



Slika 7.15. Srednje vrijednosti tvrdoće po jezgri uzoraka

Iz navedenih grafičkih prikaza vidljivo je da poboljšani čelik EN 36CrNiMo4 ima najvišu tvrdoću po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri u odnosu na tvrdo kromirani čelik EN C45 i nitrirani EN 25CrMo4. Najnižu tvrdoću po jezgri ima poboljšani čelik EN 36CrNiMo4 u odnosu na tvrdo kromirani čelik EN C45 i nitrirani EN 25CrMo4 koji imaju podjednaku tvrdoću.

U tablici 7.25. prikazane su usporedbe srednjih vrijednosti gubitka mase nakon različitog broja okretaja i srednjih vrijednosti tvrdoće po jezgri tvrdo kromiranog uzorka od čelika EN C45, nitriranog uzorka od čelika EN 25CrMo4 i poboljšanog uzorka od čelika EN 36CrNiMo4.

Tablica 7.25. Usporedbe srednjih vrijednosti gubitka mase nakon različitog broja okretaja i srednjih vrijednosti tvrdoće po jezgri tvrdo kromiranog uzorka od čelika EN C45, nitriranog uzorka od čelika EN 25CrMo4 i poboljšanog uzorka od čelika EN 36CrNiMo4.

Vrsta čelika	C45	25CrMo4	36CrNiMo4
Stanje čelika	Tvrdo kromiran	Nitriran	Poboljšan
Srednja vrijednost gubitka mase nakon 100 okretaja [g]	0,0151	0,0177	0,0136
Srednja vrijednost gubitka mase nakon 500 okretaja [g]	0,0791	0,0797	0,0611
Srednja vrijednost gubitka mase nakon 1000 okretaja [g]	0,1533	0,1493	0,1207
Srednja vrijednost tvrdoće po jezgri HV 0,2	209,5	208	152,3

8. ZAKLJUČAK

U cijevi topničkog oružja se prilikom opaljena odvija snažan i složen tribološki proces, čije se djelovanje očitava na unutarnjoj površini cijevi, ali i po cijeloj dubini poprečnog presjeka cijevi. Vrlo brzim izgaranjem baruta, u kratkom vremenu se razvija vrlo velika količina barutnih plinova i topline. Zbog zatvorenog i malog prostora, njihov tlak naglo raste, pa u jednom trenutku počinje kretanje projektila. Zbog mase projektila i njegovog kretanja uzduž kanala cijevi, na dodirnim površinama nastaje pritisak i sila trenja klizanja. Abrazija ožljebljene cijevi topničkog oružja izazvana je trenjem klizanja vodećeg prstena i centrirajućeg prstena projektila po površini kanala cijevi, kao i zadiranjem profila ožljebljenja cijevi u presjek vodećeg prstena. Abraziju cijevi izaziva i abrazivna erozija česticama gareži i zrcima baruta, kada ove čestice velikom brzinom, a pod malim kutom udaraju o površinu kanala cijevi. Iz navedenih ispitivanja i analiza rezultata zaključuje se da uzorci od čelika EN C45 u nitriranom, tvrdo kromiranom i poboljšanom stanju imaju najlošiju otpornost na abrazijsko trošenje, dok čelici EN 25CrMo4 i EN 36CrNiMo4 u tvrdo kromiranom stanju imaju podjednaku otpornost na abrazijsko trošenje. Čelični uzorak EN 36CrNiMo4 u poboljšanom stanju ima najbolju otpornost na abrazijsko trošenje u odnosu na EN C45 i EN 25CrMo4 koji su također u poboljšanom stanju.

Mjerenjem tvrdoće zaključeno je da poboljšani čelik EN 36CrNiMo4 ima najvišu tvrdoću po poprečnom presjeku od ruba prema jezgri u odnosu na tvrdo kromirani čelik EN C45 i nitrirani EN 25CrMo4. Uspoređujući srednje vrijednosti gubitka mase pri različitom broju okretaja i srednje vrijednosti tvrdoće po jezgri tvrdo kromiranog uzorka od čelika EN C45, nitriranog uzorka od čelika EN 25CrMo4 i poboljšanog uzorka od čelika EN 36CrNiMo4, zaključeno je da najbolju otpornost na abrazijsko trošenje ima poboljšani uzorak od čelika EN 36CrNiMo4 u odnosu na tvrdo kromiran uzorak od čelika EN C45 i nitrirani uzorak od čelika EN 25CrMo4.

Mjerenjem tvrdoće po jezgri uzoraka, utvrđeno je da tvrdo kromiran uzorak od čelika EN C45 i nitrirani uzorak od čelika EN 25CrMo4 imaju podjednaku tvrdoću i znatno višu u odnosu na poboljšani uzorak od čelika EN 36CrNiMo4. O stupnju istrošenosti cijevi treba voditi stalnu brigu, jer on utječe na promjenu balističkih, a time i taktičko-tehničkih značajki oružja.

LITERATURA

- [1] Jakopčić, M.: Osnove topničkog naoružanja, skripta, Zagreb, 1996.
- [2] Jakopčić, M.: Temeljne značajke tribološkog procesa u cijevi topničkog oružja, Zbornik MATRIB '99, 111-118, ISBN 953-96038-4-6, Trogir, 1999.
- [3] Ivušić, V.: Tribologija, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, ISBN 953-96038-3-8, Zagreb, 1998.
- [4] Jakopčić, M.: Otpornost na trošenje cijevi topničkih oružja, disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2002.
- [5] Jakopčić, M.: Influence of weapon barrel superheat on wear resistance of material, Book of Abstract MATERIALS-ENERGY-DESIGN 06, Dublin Institute of Technology, Dublin, Ireland, 2006.
- [6] Pavlović, D.: Osnovi konstrukcije artiljerijskog naoružanja, SSNO, Beograd, 1983.
- [7] Jakopčić, M.: Održavanje naoružanja, skripta, Zapovjedništvo za izobrazbu i obuku HkoV, Časnička škola, Zagreb, 2006.
- [8] Turk, V.: Tehnologija održavanja oružja, Centar vojnotehničkih škola KoV, Zagreb, 1989.
- [9] Tablice gađanja za haubicu 105 mm M2A1 i M4, SSNO, Beograd, 1983.
- [10] Tablice gađanja za top 130 mm M46, tablice gađanja, Vojnoizdavački zavod, Beograd, 1984.
- [11] Jakopčić, M.: Trošenje cijevi topničkog oružja, priručnik, Zagreb, 2009.
- [12] Pavelić, V.: Specifične tehnologije u proizvodnji oružja, MORH, Zagreb, 1995.
- [13], Glossary of terms and definitions in the field of friction, wear and lubrication -- tribology, OECD Publications, Paris 1969.
- [14] Ivušić, V.: "Tribologija", Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2002.
- [15] Heffer, G.: „Trošenje triboloških prevlaka pri gibanju u masi slobodnih čestica“, Disertacija, FSB, Zagreb 2002.
- [16] K.-H. Zum Gahr, „Microstructure and Wear of Materials“, Elsevier, Amsterdam-Oxford-New York 1987.
- [17]ASTM G 65-85, Standard Practice for Conducting DrySand/Rubber Abrasion Tests, ASTM Committee 1985.

- [18] Ivušić. V., Grilec. K.: Tribologija, autorizirana predavanja, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2011.
- [19] M.J. Neale, "Tribology Handbook", Butterworths, London 1973.
- [20] Filetin. T.: Svojstva i karakteristike materijala, Fakultet strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb, 1993.
- [21] Novosel. M., Krumes, D.: Posebni čelici, Strojarski fakultet u Slavonskom brodu, ISBN 953-6048-14-0, Slavonski Brod, 1998.
- [22] F. Cajner, M. Stupnišek: Osnove toplinske obrade metala, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb 2001.
- [23] <http://www.google.hr/#hl=hr&source=hp&q=pobolj%C5%A1avanje+%C4%8Delika&oq=pobolj%C5%A1avanje&aq=3&aqi=g-s3g1g->
- [24] F. Cajner, B. Matijević: Podloge za vježbu iz kolegija Toplinska obrada, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2010.
- [25] Filetin, T.; Grilec, K.: Postupci modificiranja i prevlačenja površina, priručnik za primjenu, Hrvatsko društvo za materijale i tribologiju, Zagreb, 2004.
- [26] D. Krumes: Toplinska obrada, Strojarski fakultet, Slavonski Brod, 2000.
- [27] <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=117>
- [28] D. Landek: Proizvodni postupci-toplinska obrada metala, 1. vježba, FSB, Zagreb, 2010.
- [29] J. Bosslet, M. Mreutz: TUFFTRIDE® –/ QPQ® – process, Technical information, Dufferrit GmbH, Mannheim, 2000.
- [30] F.Cajner, D.Landek: Influence of oxidation of nitrocarburized steel upon the resistance to wear and corrosion, Varšava, 2003.
- [31] B. Urlich, M. Kreutz: Technologie der Salzschnmelzen, Landsberg / Lech Moderne Industrie, 2001.
- [32] http://en.wikipedia.org/wiki/Chrome_plating